

# Universidad de Cádiz

## Proyectos fin de carrera de Ingeniería Industrial

**Centro:** ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ALGECIRAS

**Titulación:** Ingeniería Industrial

**Título:** Aceros inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío para aplicaciones estructurales: rango de propiedades y comportamientos en operaciones de fabricación.

**Autor:** Nuria Parrado Márquez

**Fecha:** Junio 2013



**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ALGECIRAS**

**ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS  
ENDURECIDOS POR DEFORMACIÓN EN FRÍO  
PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES: RANGO  
DE PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO EN  
OPERACIONES DE FABRICACIÓN**

Titulación: Ingeniería Industrial

Alumna: Nuria Parrado Márquez

Tutor: David Sales Lérda

Junio, 2013

## **DEDICATORIA**

Este trabajo fin de carrera va dedicado a mis padres, mi hermana y mi pareja, ya que sin estos “pilares” hubiera sido imposible llegar hasta donde lo he hecho. Gracias por vuestro apoyo incondicional, por confiar en mí, por acompañarme y guiarme en los momentos más complicados.

Gracias por todo.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar me gustaría agradecer la labor, dedicación y compromiso de D. Rafael Sánchez Rodríguez, Coordinador del Laboratorio de Ensayos Mecánicos y del Área de Metalurgia Física de la empresa Acerinox Europa S.A.U, gracias a su alta implicación y disponibilidad, este TFC se ha llevado a cabo de forma muy satisfactoria.

Agradecer a mi compañero José María Castellanos por su colaboración y por las largas horas compartidas durante las pruebas y ensayos en el equipo de simulación, a las personas de Programación, a los compañeros de Control de Calidad, del Taller, del laboratorio de Ensayos Mecánicos, de Metalografía y a todas las personas que me rodean, gracias por vuestra amabilidad, disponibilidad y trabajo.

Por último, agradecer la participación como tutor de D. David Sales Lérda, del departamento de Ciencia de los Materiales e Ing. Metalúrgica y Química Inorgánica de la Universidad de Cádiz y por permitir el desarrollo de este Trabajo Fin de Carrera.



# ÍNDICE GENERAL

---

## **ÍNDICE GENERAL**

### **CAPITULO 1. JUSTIFICACIÓN Y CONTEXTO .....22**

### **CAPITULO 2. ANTECEDENTES .....25**

2.1.	Los aceros inoxidables.....	25
2.1.1.	Tipos de aceros inoxidables.....	26
2.1.2.	Proceso de fabricación de los aceros inoxidables .....	32
2.1.3.	Aceros inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío. .. .....	41
2.2.	Normativa aplicable para los aceros inoxidables endurecidos por deformación en frío de uso estructural.....	54
2.2.1.	Eurocódigos.....	55
2.2.2.	Eurocódigo 3- EN 1993 .....	56
2.3.	Conformabilidad de los aceros inoxidables.....	58
2.3.1.	Doblado y recuperación elástica .....	59
2.3.2.	Procesos de estirado .....	61
2.3.3.	Procesos de embutición .....	64
2.3.4.	Curva límite de conformabilidad .....	67
2.3.5.	Acabado superficial.....	68
2.4.	Soldabilidad de los aceros inoxidables endurecidos .....	69
2.4.1.	Influencia de la estructura (D. Schaffler y DeLong).....	72
2.4.2.	Energía de aportación o Input térmico .....	74
2.4.3.	Zona afectada térmicamente (HAZ).....	75
2.4.4.	Velocidad de enfriamiento.....	76
2.4.5.	Métodos de soldeo.....	77

2.4.6.	Efectos indeseables de la soldadura .....	84
2.4.7.	Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos .....	85
<b>CAPITULO 3. OBJETIVOS Y ALCANCE .....</b>		<b>90</b>
<b>CAPÍTULO 4.- MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>		<b>93</b>
4.1.	Materiales.....	93
4.1.1.	Estadística propiedades mecánicas.....	94
4.1.2.	Selección aceros endurecidos por deformación en frío .....	94
4.1.3.	Selección de materiales para ensayo HAZ .....	97
4.1.4.	Materiales para soldadura TIG.....	99
4.2.	Equipos y descripción de ensayos .....	99
4.2.1.	Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X.....	100
4.2.2.	Equipos LECO para determinación de C y S.....	102
4.2.3.	Equipo analizador para determinación de N y O .....	103
4.2.4.	Microscopio óptico.....	104
4.2.5.	Ferritoscopio .....	106
4.2.6.	Máquina Universal de Zwick Roel Kortaues.....	107
4.2.7.	Máquina de doblado .....	111
4.2.8.	Rugosímetro.....	112
4.2.9.	Durómetro Vickers y Rockwell .....	114
4.2.10.	Máquina de embutición.....	118
4.2.11.	Equipo para ensayos termomecánicos Gleeble 1500D.....	119
4.2.12.	Banco de soldadura Euromatig 35-2.....	11934

**CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....141**

5.1. Revisión bibliográfica y estudio estadístico de los requisitos y especificaciones de los acabados endurecidos por deformación en frío. ....	141
5.1.1. Resultados de la revisión bibliográfica de la normativa aplicable .....	141
5.1.2. Análisis de los resultados para el cumplimiento de los objetivos del Eurocódigo.....	144
5.1.3. Análisis de los resultados del estudio estadístico de las propiedades mecánicas básicas de los aceros con acabado endurecido por deformación en frío. ....	152
5.2. Resultados de la caracterización completa experimental.....	156
5.2.1. Resultados del análisis de la composición química .....	156
5.2.2. Evaluación de la influencia del programa de reducción del proceso de fabricación de los acabados endurecidos por deformación en frío.....	156
5.2.3. Resultados del análisis microestructural .....	158
5.2.4. Resultados de la medida del tamaño de grano, de la estabilidad de la austenita y del magnetismo .....	161
5.2.5. Resultados de los ensayos para la caracterización mecánica de los materiales acopiados.....	168
5.2.6. Evaluación del acabado superficial.....	16876
5.3. Estudio de la conformabilidad de los aceros endurecidos por deformación en frío .....	179
5.3.1. Resultados de la evaluación de la aptitud al doblado.....	182
5.3.2. Análisis de los resultados para la evaluación de la aptitud de los materiales endurecidos en operaciones de embutición .....	183
5.3.3. Análisis de los resultados para el estudio del comportamiento al estirado .....	185
5.3.4. Recuperación elástica del material .....	190
5.4. Estudio de la soldabilidad de los aceros endurecidos por deformación en frío. ....	193

5.5.1.	Análisis de los resultados obtenidos tras los ensayos de simulación HAZ .....	193
5.5.2.	Análisis de los resultados tras la realización de la soldadura TIG .....	202
<b>CAPITULO 6.- CONCLUSIONES .....</b>		<b>212</b>
6.1.	Conclusiones y discusión de los resultados .....	212
6.2.	Conclusiones finales.....	216
<b>ANEXO I.- RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS ENDURECIDOS .....</b>		<b>219</b>
<b>ANEXO II.- RESULTADOS ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS ENDURECIDOS.....</b>		<b>222</b>
<b>ANEXO III.- RESULTADOS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS ENDURECIDOS EN LAS TRES DIRECCIONES AL SENTIDO DE LAMINACIÓN.....</b>		<b>228</b>
<b>ANEXO IV.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE SPRINGBACK.....</b>		<b>234</b>
<b>ANEXO V.- RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL TRAS EL ENSAYO DE SIMULACIÓN HAZ .....</b>		<b>239</b>
<b>ANEXO VI.- RESULTADOS DE LAS MUESTRAS SOLDADAS CON TIG SIN APORTE .....</b>		<b>250</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>255</b>

## **ÍNDICE FIGURAS**

CAPITULO 2. ANTECEDENTES .....	25
Figura 2.1.- Estructura de acero inoxidable austenítico EN 1.4301 en estado de recocido. ....	27
Figura 2.2.- Estructura de acero inoxidable ferrítico EN 1.4016 en estado de recocido	28
Figura 2.3.- Estructura de acero inoxidable dúplex 2205 en estado de recocido. ....	29
Figura 2.4.- Estructura de acero inoxidable martensítico 1.4031 templado. ....	30
Figura 2.5.- Estructura acero inoxidable endurecido por precipitación (PH) x 200 aumentos. ....	32
Figura 2.6.- Esquema del horno eléctrico (izda) y del convertidor AOD (dcha) [14].	34
Figura 2.7.- Esquema de la colada continua de desbastes [14]. ....	35
Figura 2.8.- Esquema etapa de laminación en caliente. ....	38
Figura 2.9.- Esquema disposición rodillos y Laminador Sendzimir (ZM) [14] ....	39
Figura 2.10.- Línea de recocido y decapado (AP) .....	40
Figura 2.11.- Bucle de entrada al horno de recocido brillante (BA) .....	40
Figura 2.12.- Varias rutas hipotéticas de formación de martensita- $\alpha'$ a partir de $\gamma$ [15]	44
Figura 2.13.- Mecanismo de transformación martensítica de un acero (Distorsión de Bain) [27] .....	45
Figura 2.14.- Estructura martensítica [27] .....	46
Figura 2.15.- Formación de placas de martensita: a) deslizadas, b) macladas .....	49
Figura 2.16.- Esquema productivo de aceros inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío. ....	51
Figura 2.17.- Curva de temple para un acero EN 1.4301 o AISI 304[20] .....	52
Figura 2.18.- Esquema de algunas operaciones de doblado .....	59
Figura 2.19.- Principio del ensayo de Springback .....	60
Figura 2.20.- Muestra de partida (izda) y tras el ensayo (dcha) de ensanchamiento de orificios .....	62

Figura 2.21.- Material tras la realización del ensayo de determinación del índice Erichsen.....	63
Figura 2.22.-Esquema de las diferentes direcciones principales para calcular $r_m$ y $\Delta r$ [30]. .....	65
Figura 2.23.- Embutición profunda de una copa cilíndrica antes de la embutición (izda) y después de la embutición (dcha).....	66
Figura 2.24.- Diagrama FLD completo (Keeler y Goodwin) [34] y [28] .....	67
Figura 2.25.- Perfil de la superficie [19] .....	68
Figura 2.26.- Ciclo térmico de la soldadura.[62] .....	70
Figura 2.27.- Distintas zonas de la unión soldada [40] .....	71
Figura 2.28.- Diagrama de Schaffler [40] .....	73
Figura 2.29.- Diagrama de DeLong [40] .....	73
Figura 2.30.- Esquema proceso GTAW/TIG [14] .....	80
Figura 2.31.- Esquema proceso PAW [14] .....	81
Figura 2.32.- Esquema proceso GMAW/MIG [14] .....	82
Figura 2.33.- Materiales de aporte [40].....	86
 CAPÍTULO 4.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	93
Figura 4.1.- Espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X.....	101
Figura 4.2.- Casquillo porta-probeta para la determinación de la composición química mediante rayos-X .....	101
Figura 4.3.- Microscopio óptico.....	105
Figura 4.4.- Vista general máquina universal de ensayos de tracción (izda) y equipos auxiliares (mordaza y horno) (dcha) .....	108
Figura 4.5.- Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción a temperatura ambiente [55] .....	109
Figura 4.6.- Rugosímetro .....	113
Figura 4.7.- Durómetro Vickers.....	115

Figura 4.8.- Tabla para la conversión de las distintas escalas de dureza [19] .....	117
Figura 4.9.- Máquina de embutición BUP600 .....	118
Figura 4.10.- Conjunto del equipo Gleeble 1500 de Acerinox Europa. S.A.U.....	120
Figura 4.11.- Sistema de ducha vertical (izda) y horizontal (dcha) .....	123
Figura 4.12.- Muestras ensayadas en la máquina de simulación termodinámica Gleeble 1500D .....	124
Figura 4.13.- Puente móvil (izda) y punzón para springback (dcha) .....	125
Figura 4.14.- Ejecución del ensayo de springback .....	125
Figura 4.15.- Colocación de la probeta para el ensayo de simulación HAZ .....	127
Figura 4.16.- Configuración del programa de simulación HAZ .....	129
Figura 4.17.- Elección del tipo de curva de enfriamiento .....	130
Figura 4.18.- Representación de las cuatro curvas de enfriamiento resultantes según las configuración de cada programa de simulación HAZ.....	133
Figura 4.19.- Banco de soldadura TIG .....	134
Figura 4.20.- Dimensiones de las muestras para la soldadura TIG [25] .....	135
Figura 4.21.- Ensayos exigidos por la norma UNE-EN 15614-1 para la verificación de la calidad de la unión soldada [60].....	138
Figura 4.22.- Esquema para la medida de la microdureza de las uniones soldadas...	139
 CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	 141
Figura 5.1.- Análisis de la relación entre el alargamiento y el espesor de los materiales	148
Figura 5.2.- Anisotropía de los valores del límite elástico de las muestras en estudio	149
Figura 5.3.- Anisotropía de los valores de la resistencia a la tracción de las muestras en estudio.....	150
Figura 5.4.- Relaciones de las propiedades mecánicas básicas: $R_{p0,2\%}$ - $R_m$ (izda) y $R_m$ -HV (dcha) del estudio estadístico.....	155
Figura 5.5.- Evaluación de la relación del porcentaje de reducción en cada etapa de laminación con el espesor requerido.....	157



Figura 5.6.- Microestructura del tipo EN 1.4301 (v1) ¼ duro.....	158
Figura 5.7.- Microestructura del tipo EN 1.4301 (v2) ¼ duro.....	159
Figura 5.8.- Microestructura 1.4310 ¼ duro de deformación .....	159
Figura 5.9.- Microestructura del tipo EN 1.4301 (v1) ½ duro.....	159
Figura 5.10.- Microestructura del tipo EN 1.4301 (v1) espesor 0,75mm y ¾ duro..	160
Figura 5.11.- Microestructura 1.4301 (v1) en estado de recocido.....	160
Figura 5.12.- Influencia del grado de endurecimiento (reducción 2º LF) en el grado de magnetismo. ....	164
Figura 5.13.- Relación del contenido de magnetismo y del grado de reducción .....	166
Figura 5.14.- Relación del contenido de magnetismo y de la resistencia a la tracción	167
Figura 5.15.- Representación gráfica de las propiedades mecánicas de los materiales ¼ duro .....	171
Figura 5.16.- Valores medios de las propiedades mecánicas por tipo de acero ¼ duro	172
Figura 5.17.- Valores medios de las propiedades mecánicas por tipo de acero ½ duro	173
Figura 5.18.- Valores medios de las propiedades mecánicas por tipo de acero ¾ duro	173
Figura 5.19.- Relación entre las propiedades mecánicas del tipo EN 1.4301 (v1) con distintos acabados endurecidos por deformación y con acabados 2B.....	174
Figura 5.20.- Relación entre las propiedades mecánicas del tipo EN 1.4301 (v2) con grado ¼ duro y con acabados 2B .....	175
Figura 5.21.- Estudio de la influencia del alargamiento del material de partida en los valores de anisotropía medio ( $r_m$ ) .....	184
Figura 5.22.- Relación del exponente de endurecimiento “n” frente a la resistencia a la tracción (superior) y a la dureza (inferior) del tipo de acero EN 1.4301 (v1) .....	186
Figura 5.23.- Relación del exponente de endurecimiento “n” y la resistencia a la tracción (superior) y a la dureza (inferior) del tipo de acero EN 1.4301 (v2) .....	187
Figura 5.24.- Relación del exponente de endurecimiento “n” y la resistencia a la tracción (superior) y a la dureza (inferior) del tipo de acero EN 1.4310 .....	188

Figura 5.25.- Relación entre el índice Erichsen y la resistencia a la tracción de los tipos de acero EN 1.4301 (v1) y (v2) .....	189
Figura 5.26.- Relación entre el índice Erichsen y el alargamiento de los tipos de acero EN 1.4301 (v1) y (v2).....	190
Figura 5.27.- Relación del springback entre el límite elástico y el espesor por tipo de acero.....	191
Figura 5.28.- Influencia del grado de endurecimiento en la recuperación elástica del material. ....	192
Figura 5.29.- Influencia de los distintos ciclos térmicos en el tamaño de grano .....	197
Figura 5.30.- Influencia de los distintos ciclos térmicos en el magnetismo en función de la reducción de la 2ª laminación en frío .....	199
Figura 5.31.- Influencia de los distintos ciclos térmicos en la dureza de los materiales estudiados.....	200
Figura 5.32.- Relación de los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas del material base, del material soldado y de un acabado 2B .....	207
Figura 5.33.- Relación de los resultados de la medida de dureza de los acabados 2B y las distintas zonas del material soldado. ....	209
 ANEXO IV.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE SPRINGBACK.....	234
Figura AIV.1.- Muestras tras el ensayo de springback .....	234

## **ÍNDICE TABLAS**

CAPÍTULO 4.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	93
Tabla 4.1.- Composición química media de los tres aceros acopiados .....	94
Tabla 4.2.- Aceros endurecidos por deformación en frío acopiados. ....	95
Tabla 4.3.- Identificación de las muestras acopiadas de EN 1.4301 (v1) .....	96
Tabla 4.4.- Identificación de las muestras acopiadas de EN 1.4301 (v2) .....	97
Tabla 4.5.- Identificación de las muestras acopiadas de EN 1.4310 .....	97
Tabla 4.6.- Materiales para ensayo HAZ .....	98
Tabla 4.7.- Ensayos y equipos empleados .....	100
Figura 4.10.- Conjunto del equipo Gleeble 1500 de Acerinox Europa .....	120
Tabla 4.8.- Propiedades físicas del tipo de acero EN 1.4301[24].....	128
Tabla 4.9.- Condiciones de soldeo para el estudio de simulación HAZ.....	128
Tabla 4.10.- Condiciones para la configuración de los cuatro programas de simulación HAZ.....	132
Tabla 4.11.- Condiciones de soldeo óptimas obtenidas a partir del estudio de simulación de la HAZ en el equipo Gleeble 1500D.....	136
Tabla 4.12.-Condiciones de soldeo de los distintos materiales para la realización de la soldadura TIG .....	137
Tabla 4.13.- Dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción transversal a temperatura ambiente de la unión soldada.....	139
 CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	 141
Tabla 5.1.- Propiedades mecánicas aceros 1/4, 1/2 y 3/4 duro según ASTM 666 [4] .....	141
Tabla 5.2.- Niveles de resistencia a la tracción en estado de conformado en frío (ruta de proceso 2H) según la UNE-EN 10088-2 (Tabla 17) [59].....	142
Tabla 5.3.- Niveles del límite elástico convencional al 0.2% en estado de conformado en frío (ruta de proceso 2H) según la UNE-EN 10088-2 (Tabla 18) [59] .....	142

Tabla 5.4.- Valores nominales del límite elástico y de la resistencia última a tracción para aceros estructurales trabajados en frío según la norma UNE-EN 1993-1-4 [49]	143
Tabla 5.5.- Relación de las propiedades mecánicas básicas para los distintos rangos de $R_m$ .....	145
Tabla 5.6.- Relación de las propiedades mecánicas básicas para los distintos rangos de $R_{p0,2\%}$ .....	146
Tabla 5.7.- Resultados de la aplicación de los tres criterios de ductilidad. ....	147
Tabla 5.8.- Estadística de las propiedades mecánicas básicas del acero EN 1.4301 con distintos grados de deformación en frío.....	153
Tabla 5.9.- Condiciones de fabricación de los aceros endurecidos seleccionados ....	157
Tabla 5.10.-GS, estabilidad de la austenita y magnetismo de los materiales $\frac{1}{4}$ duro	163
Tabla 5.11.- GS, estabilidad de la austenita y magnetismo de los materiales $\frac{1}{2}$ duro	163
Tabla 5.12.- GS, estabilidad de la austenita y magnetismo de los materiales $\frac{3}{4}$ duro	163
Tabla 5.13.- Propiedades mecánicas de los materiales $\frac{1}{4}$ duro .....	170
Tabla 5.14.- Propiedades mecánicas de los materiales $\frac{1}{2}$ duro .....	170
Tabla 5.15.- Propiedades mecánicas de los materiales $\frac{3}{4}$ duro .....	171
Tabla 5.16.- Resultados de la medida de la rugosidad media superficial de los materiales $\frac{1}{4}$ duro .....	177
Tabla 5.17.- Resultados de la medida de la rugosidad media superficial de los materiales $\frac{1}{2}$ duro .....	177
Tabla 5.18.- Resultados de la medida de la rugosidad media superficial de los materiales $\frac{3}{4}$ duro .....	177
Tabla 5.20.- Resultados de las propiedades analizadas para el estudio de conformabilidad de los materiales $\frac{1}{2}$ duro.....	181
Tabla 5.21.- Resultados de las propiedades analizadas para el estudio de conformabilidad de los materiales con grado de endurecimiento $\frac{3}{4}$ duro.....	182
Tabla 5.22.- Resultados del análisis microestructural de la muestra B1 .....	194
Tabla 5.23.- Resultados de la medida del tamaño de grano tras la aplicación de las simulaciones.....	197

Tabla 5.24.- Resultados del grado de magnetismo de los materiales tras las simulaciones HAZ .....	198
Tabla 5.25.- Resultados de la medida de la dureza tras la aplicación de los programas HAZ.....	200
Tabla 5.26.- Condiciones iniciales de soldeo para la soldadura TIG sin aporte .....	201
Tabla 5.27.- Resultados de la medida del tamaño de grano de la HAZ de las muestras soldadas con TIG.....	205
Tabla 5.28.- Resultados de la aptitud al doblado a 180°.....	205
Tabla 5.29.- Resultados del ensayo de tracción a temperatura ambiente de las muestras soldadas con TIG sin aporte. ....	206
Tabla 5.30.- Resultados de la medida de dureza en las distintas zonas características de las muestras soldadas con TIG.....	208

#### ANEXO I.- RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS ENDURECIDOS.....

Tabla AI.1.- Composición química del EN 1.4301 (v1).....	220
Tabla AI.2.- Composición química del EN 1.4301 (v2).....	220
Tabla AI.3.- Composición química del EN 1.4310.....	220

#### ANEXO II.- RESULTADOS ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS ENDURECIDOS.....

Tabla AII.1.- Resultados de las microestructuras EN 1.4301 (v1) ¼ duro. ....	224
Tabla AII.2.- Resultados de las microestructuras EN 1.4301 (v2) ¼ duro. ....	224
Tabla AII.3.- Resultados de las microestructuras EN 1.4310 ¼ duro .....	224
Tabla AII.4.- Resultados de las microestructuras EN 1.4301 (v1) ½ duro. ....	225
Tabla AII.5.- Resultados de las microestructuras EN 1.4301 (v1) ¾ duro. ....	226

ANEXO III.- RESULTADOS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS ENDURECIDOS EN LAS TRES DIRECCIONES AL SENTIDO DE LAMINACIÓN .....	228
Tabla AIII.1.- Propiedades mecánicas del tipo EN 1.4301 (v1) $\frac{1}{4}$ duro .....	230
Tabla AIII.2.- Propiedades mecánicas del EN 1.4301 (v2) $\frac{1}{4}$ duro .....	231
Tabla AIII.3.- Propiedades mecánicas del EN 1.4310 $\frac{1}{4}$ duro .....	231
Tabla AIII.4.- Propiedades mecánicas del EN 1.4301 (v1) $\frac{1}{2}$ duro .....	232
Tabla AIII.5.- Propiedades mecánicas del EN 1.4301 (v1) $\frac{3}{4}$ duro .....	232
 ANEXO IV.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE SPRINGBACK.....	234
Tabla AIV.1.- Resultados de la recuperación elástica del EN 1.4301 (v1) con grado de endurecimiento $\frac{1}{4}$ duro .....	235
Tabla AIV.2.- Resultados de la recuperación elástica del EN 1.4301 (v2) con grado de endurecimiento $\frac{1}{4}$ duro .....	236
Tabla AIV.3.- Resultados de la recuperación elástica del EN 1.4310 con grado de endurecimiento $\frac{1}{4}$ duro .....	236
Tabla AIV.4.- Resultados de la recuperación elástica EN 1.4301 (v1) con grado de endurecimiento $\frac{1}{2}$ duro .....	236
Tabla AIV.5.- Resultados de la recuperación elástica EN 1.4301 (v1) con grado de endurecimiento $\frac{3}{4}$ duro .....	237
 ANEXO V.- RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL TRAS EL ENSAYO DE SIMULACIÓN HAZ .....	239
Tabla AV.1.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) $\frac{1}{2}$ duro y espesor 0,7mm.....	239
Tabla AV.2.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) $\frac{3}{4}$ duro y espesor 0,75mm.....	240
Tabla AV.3.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) $\frac{1}{4}$ duro y espesor 2,3mm.....	241

Tabla AV.4.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) $\frac{1}{2}$ duro y espesor 2,4mm.....	242
Tabla AV.5.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) $\frac{1}{4}$ duro y espesor 1,5mm.....	243
Tabla AV.6.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v2) $\frac{1}{4}$ duro y espesor 1,5mm.....	244
Tabla AV.7.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) $\frac{1}{4}$ duro y espesor 2,3mm.....	245
Tabla AV.8.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v2) $\frac{1}{4}$ duro y espesor 2,3mm.....	246
Tabla AV.9.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v2) $\frac{1}{4}$ duro y espesor 2,7mm.....	247
Tabla AV.10.- Resultados de la microestructura del EN 1.4310 $\frac{1}{4}$ duro y espesor 2,6mm.....	248
ANEXO VI.- RESULTADOS DE LAS MUESTRAS SOLDADAS CON TIG SIN APORTE .....	250
Tabla AVI.1.- Inspección visual de las muestras soldadas con TIG .....	251
Tabla AVI.2.- Análisis macroestructural y microestructural de las muestras soldadas con TIG.....	253

## GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

<b>Acrónimo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Traducción (si procede)</b>
<b>A</b>	Alargamiento	-
<b>AISI</b>	American Iron and Steel Institute	Instituto americano del hierro y el acero
<b>AP</b>	Annealing and Pickling	Decapado y recocido
<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials	Sociedad americana para materiales y ensayos
<b>BA</b>	Bright Annealing	Recocido brillante
<b>BCC</b>	Body cubic centered	Cúbica centrada en el cuerpo
<b>E</b>	Módulo elástico	-
<b>EC</b>	Eurocódigo	-
<b>EN</b>	Euroean Norm	Norma europea
<b>ESP</b>	Espesor	-
<b>FCC</b>	Face cubic centered	Cúbica centrada en las caras
<b>FLC</b>	Forming Limit Curve	Curva límite de conformabilidad
<b>FLD</b>	Forming Limit Diagram	Diagrama límite de conformabilidad
<b>GS</b>	Grain Size	Tamaño de grano
<b>HAZ</b>	Heat affected zone	Zona afectada térmicamente
<b>HCP</b>	Hexagonal Close-Packed	Hexagonal compacta
<b>HRB</b>	Hardness Rockwell B	Dureza Rockwell B
<b>HRC</b>	Hardness Rockwell C	Dureza Rockwell C
<b>HV</b>	Hardness Vickers	Dureza en escala Vickers
<b>IE</b>	Índice Erichsen	-
<b>IT</b>	Input Térmico	Afectación térmica
<b>LDR</b>	Limiting Draw Ratio	Relación de límite de embutibilidad
<b>LF</b>	Laminación en frío	-
<b>MB</b>	Material base	-
<b>MG</b>	Magnetismo	-
<b>MIG</b>	Metal Inert Gas	Soldadura por arco con gas inerte metálico
<b>PAW</b>	Plasma Arc Welding	Plasma



<b>Acrónimo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Traducción (si procede)</b>
<b>PH</b>	Precipitation Hardening	Aceros inoxidables endurecibles por precipitación
<b>PRE</b>	Pitting Resistance Equivalent	Indicador de la resistencia a la corrosión por picaduras
<b>RED</b>	Reducción	-
<b>Rm</b>	Resistencia máxima a la tracción	-
<b>Rp<sub>0,2%</sub></b>	Límite elástico al 0,2%	-
<b>S.A.U</b>	Sociedad Anónima Unipersonal	-
<b>SPB</b>	Springback	Recuperación elástica
<b>TFC</b>	Trabajo Fin de Carrera	-
<b>TIG</b>	Tungsten Inert Gas	Soldadura por arco eléctrico con gas inerte
<b>UTS</b>	Ultimate Tensile Strength	Resistencia máxima a la tracción

# **CAPÍTULO 1**

---

## **JUSTIFICACIÓN Y CONTEXTO**

## **CAPITULO 1. JUSTIFICACIÓN Y CONTEXTO**

El desarrollo de este Trabajo fin de carrera (TFC) se ha llevado a cabo en las instalaciones del laboratorio de la factoría de Palmones Acerinox Europa S.A.U. en el marco del programa de desarrollo de producto de dicha empresa, durante parte del periodo de la beca de investigación PVGPC2010-071 concedida por el Vicerrectorado de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación de la Universidad de Cádiz a la alumna.

Los aceros inoxidable austeníticos presentan excelentes propiedades mecánicas, de conformabilidad y de resistencia a la corrosión, y una considerable capacidad de endurecimiento por deformación. Esto último los hace especialmente aptos para aplicaciones estructurales, en las que el requerimiento principal es un elevado límite elástico. Sin embargo, la capacidad de endurecimiento no ha sido explotada ampliamente debido, entre otros factores, a la insuficiente definición del conjunto de características de los aceros austeníticos trabajados en frío en estado de suministro (hecho reflejado en una normativa escasa y ambigua) y el desconocimiento de su comportamiento en las etapas de fabricación de productos, especialmente en las operaciones de conformado y soldadura.

Acerinox Europa S.A.U. es consciente de estas limitaciones y ha emprendido diversas iniciativas para resolverlas mediante líneas de desarrollo que pretenden mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de estos materiales, en las etapas de producción (del acero) y de fabricación (de los productos con estos materiales), y a partir de ello, contribuir con la optimización de las reglas de diseño y desarrollo de la normativa aplicable.

El presente TFC supone el inicio de una de estas líneas de investigación con el fin de **determinar la relación entre las principales variables del proceso de producción de aceros inoxidable austeníticos trabajados en frío y la**

**microestructura resultante, así como la influencia de ambas sobre las propiedades del acero en estado de suministro.**

De este modo, este TFC aporta los primeros resultados a esa línea de investigación, entre los que se incluyen un análisis del proceso y su influencia sobre la microestructura resultante (generación de martensita, contenido magnético y tamaño de grano), comportamiento mecánico (resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento, módulo elástico y dureza), conformabilidad (doblado, anisotropía y comportamiento en operaciones de estirado) y soldabilidad.

Además del objetivo de conocimiento que se establece con el citado programa de trabajo, Acerinox Europa S.A.U. proporcionará los datos generados en este TFC al Grupo de Evolución encargado de la gestión de los contenidos de la norma Europea EN 1993 Parte 1-4, que se está preparando en la actualidad para regular el diseño de estructuras en acero inoxidable.

# **CAPÍTULO 2**

---

## **ANTECEDENTES**

## CAPITULO 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aquellas aleaciones férreas que contienen al menos un 10,5% de cromo [58]. Dicho contenido de cromo garantiza la formación de una capa protectora de óxido de cromo llamada “*capa pasiva*” a partir de un ambiente oxidante (por ejemplo el aire), que lo protege frente a la agresión de los distintos agentes externos. Esta capa protectora tiene la propiedad de regenerarse cuando se daña por alguna acción externa y proporciona a estos materiales una alta resistencia a la corrosión en un amplio abanico de medios agresivos. Además del cromo, los aceros inoxidables están compuestos por hierro, carbono y otros elementos de aleación principalmente níquel, molibdeno y manganeso. La combinación de éstos confiere al material unas ciertas propiedades mecánicas y de resistencia frente a la corrosión.

Otro aspecto a destacar es la versatilidad de estos materiales gracias a sus notables prestaciones mecánicas en un amplio rango de temperatura (buena tenacidad a bajas temperaturas y buena resistencia a altas temperaturas), buena maquinabilidad y soldabilidad gracias a la presencia de ciertos elementos como el azufre, y excelente aptitud a la deformación plástica que lo hace adecuado para una amplia gama de operaciones de conformado. [29]

En función del grado de aleación y de la composición química, los aceros inoxidables van a tener una estructura que proporciona al material unas determinadas propiedades físicas. Esto permite establecer una clasificación de los aceros inoxidables con unos valores mínimos y máximos característicos. La identificación de los aceros inoxidables más extendida se rige según la designación AISI XXX, y a nivel europeo y español por la identificación EN 1.XXYY [18]

Los aceros inoxidables se dividen en cinco familias: austeníticos, ferríticos, austeno-ferríticos o dúplex, martensíticos y endurecidos por precipitación. La norma UNE-

EN 10088-1 [58] contiene la lista de los aceros inoxidable con la descripción de los distintos tipos de aceros pertenecientes a cada una de las cinco familias, la correspondiente composición química, características físicas y propiedades mecánicas.

### **2.1.1. Tipos de aceros inoxidables**

En este apartado se describen los aspectos más característicos de cada una de las cinco familias y algunos tipos en concreto.

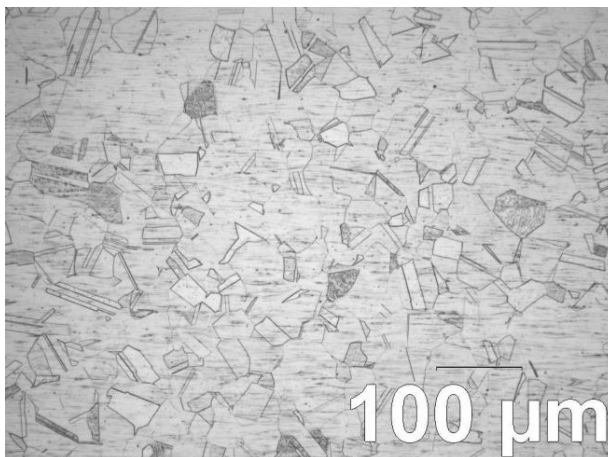
#### **a) Aceros Inoxidables Austeníticos**

Los aceros inoxidables austeníticos presentan una estructura cúbica centrada en las caras formada mayoritariamente por austenita a temperatura ambiente (figura 2.1). Son aceros no magnéticos en su estado de recocido. Estos aceros mantienen su elevada resistencia mecánica en un amplio rango de temperatura, además poseen una muy buena conformabilidad y muy buena resistencia a la corrosión en multitud de medios y condiciones. La adición de otros elementos como molibdeno, cobre y manganeso proporciona a estos materiales otras propiedades que lo hacen adecuados para una amplia variedad de aplicaciones y aptos para procesos de fabricación como la soldadura y conformado.

El tipo de acero austenítico más representativo es el EN 1.4301 (AISI 304) por lo que respecta a la resistencia a la corrosión atmosférica y se emplea de forma significativa en la industria química, alimentaria y médica. El EN 1.4401 (AISI 316), gracias a su contenido de molibdeno, presentan una significativa mejora en cuanto a resistencia a la corrosión por picaduras e intersticios en medios clorados.

Una característica muy destacable de estos aceros es su elevada capacidad de endurecimiento por deformación en frío y no por tratamiento térmico, que depende

en gran medida de la estabilidad de la fase austenita a la transformación martensítica. Este fenómeno se describe en detalle en el punto 2.1.3 de este capítulo.



*Figura 2.1.- Estructura de acero inoxidable austenítico EN 1.4301 en estado de recocido.*

#### **b) Aceros inoxidables ferríticos**

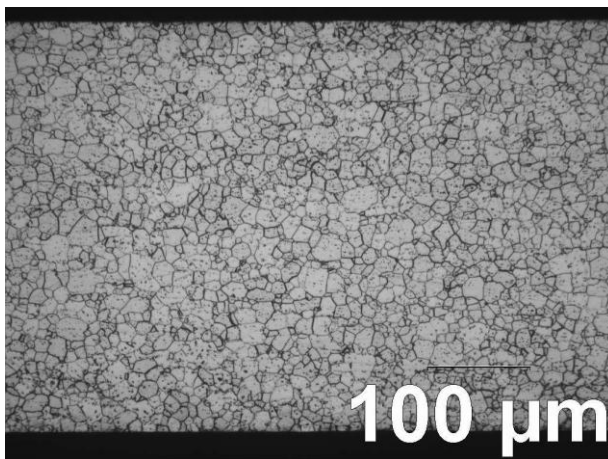
Los aceros inoxidables ferríticos tienen una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (figura 2.2) formada mayoritariamente por ferrita. Su contenido en cromo puede variar entre 12 y 29 % y un nivel de níquel residual [38]. Son materiales ferromagnéticos y se endurecen mucho menos que los austeníticos por deformación en frío. Se caracterizan por tener una resistencia mecánica moderada y buen comportamiento en cuanto a conformabilidad y resistencia a la corrosión atmosférica en aplicaciones interiores. La ausencia de puntos de transformación hace imposible mejorar sus prestaciones mecánicas a través de tratamientos térmicos. [18]

Debido a su bajo o casi su casi nulo contenido en Níquel, resulta ser el tipo de acero inoxidable más económico.

Los aceros inoxidables ferríticos más extendidos son en primer lugar, el EN 1.4016 (AISI 430) adecuado en multitud de medios y aplicaciones, tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas y en segundo lugar, el EN 1.4512 (AISI 409L)



que gracias a la presencia de un elemento estabilizador como el titanio, los hace particularmente óptimos para la fabricación de tubos de escape de automóviles.



*Figura 2.2.- Estructura de acero inoxidable ferrítico EN 1.4016 en estado de recocido*

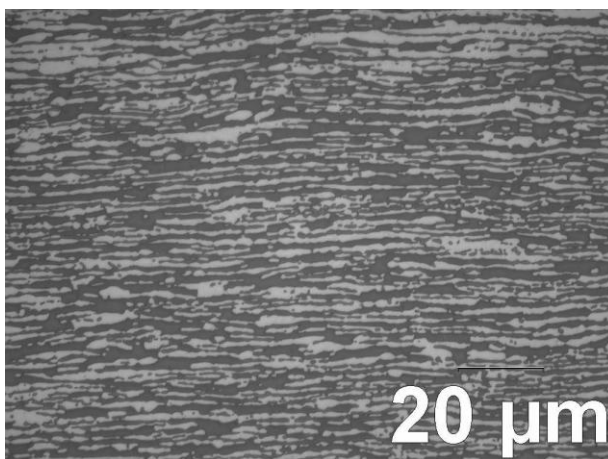
### **c) Aceros Inoxidables Austeno-ferríticos o Dúplex**

Los aceros austeno-ferríticos presentan una estructura bifásica en su estado de suministro formada aproximadamente por un 50% de ferrita y un 50% de austenita (figura 2.3) con contenidos de cromo, níquel, molibdeno y nitrógeno variables según el tipo de acero. Su contenido en ferrita hace que estos aceros presenten un cierto grado de magnetismo. Su estructura bifásica permite a estos aceros combinar las mejores propiedades de ambas fases, proporcionándoles unas prestaciones altas en cuanto a propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, que hace estos aceros más competitivos y adecuados para multitud de aplicaciones y condiciones de servicio.

En cuanto a las propiedades mecánicas, estos aceros presentan un elevado límite elástico, del orden del doble al de los aceros austeníticos con similar índice PRE (*Pitting Resistance Equivalent*) indicador de la resistencia a la corrosión por picaduras. Además, estos aceros tienen una elevada resistencia a la corrosión bajo tensiones y pueden soldarse convenientemente con las condiciones adecuadas.

Algunos de los aceros dúplex más característicos son EN 1.4462 o 2205 (22% Cr y 5% Ni) presenta una resistencia a la corrosión y unas propiedades mecánicas superiores a la de los tipos EN 1.4482 o 2001 (20% Cr y 1% Ni) y EN 1.4482 o 2304 (23% Cr y 4% Ni), gracias a sus superiores contenidos de elementos de aleación como níquel, molibdeno y nitrógeno.

Las aplicaciones de los aceros inoxidables dúplex son las plataformas off-shore, buques-tanque, estructurales, plantas químicas y petroquímicas, componentes subacuáticos, conducciones marinas, industria alimenticia y papelera, sistemas de protección medioambiental, etc.



*Figura 2.3.- Estructura de acero inoxidable dúplex 2205 en estado de recocido.*

#### **d) Aceros inoxidables martensíticos**

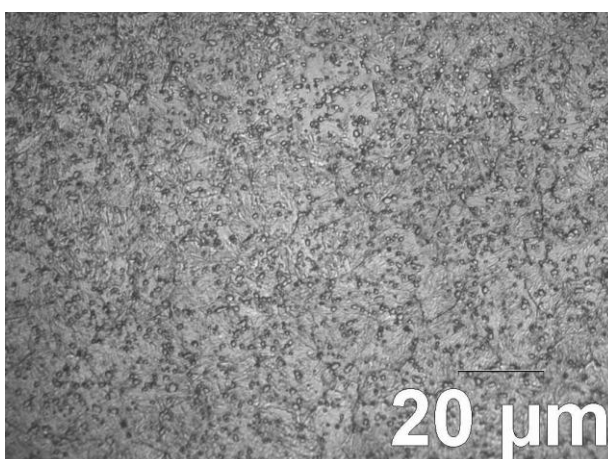
Los aceros inoxidables martensíticos presentan en condiciones de servicio una estructura cristalina hexagonal compacta (figura 2.4) formada por martensita. Se caracterizan por tener un contenido de cromo en torno al 12-18% y un elevado contenido de carbono (el mayor de todas las familias) entre 0,15-1% [38], que le proporciona unas altas prestaciones mecánicas (alto límite elástico, resistencia a la tracción y dureza). Son materiales magnéticos, pueden trabajarse en frío sin dificultad cuando se encuentran en estado de recocido (Ferrita + carburo) y se endurecen por tratamiento térmico de *Temple* [13]. Además, puede ir seguido de un tratamiento de

*Revenido* para aliviar tensiones y mejorar las prestaciones de servicio de los aceros martensíticos. Presentan una resistencia a la corrosión moderada.

Son aceros inoxidable en los que a altas temperaturas presentan una estructura austenítica y tras un tratamiento de térmico de temple, se transforma en martensita, alcanzando una elevada dureza y resistencia al desgaste.

El uso más extendido de los aceros inoxidables martensíticos consiste en: cuberterías (especialmente cuchillería), herramientas multiusos y de corte, instrumentos quirúrgicos, etc.

El acero más representativo dentro de este grupo es el EN 1.4006 (AISI 410 - 12% Cr- 0,15% C - 1,0% Mn) que junto al acero EN 1.4057 (AISI 431) puede ser empleado en la fabricación de pernos, ejes de bombas, válvulas, alabes de turbinas a gas y vapor. Un EN 1.4125 (AISI 440 - alto contenido en carbono) dependiendo del tratamiento de temple alcanzará un valor u otro de dureza y resistencia al desgaste adecuados para instrumentos quirúrgicos, y junto con el EN 1.4031 (AISI 420 - contenido medio de carbono) son los más adecuados para la fabricación de cuchillos.



*Figura 2.4.- Estructura de acero inoxidable martensítico 1.4031 templado.*

**e) Aceros endurecidos por precipitación**

Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación o PH (*Precipitation Hardening*) son aquellos cuyas características mecánicas se obtienen mediante un tratamiento de endurecimiento secundario, posterior a un tratamiento térmico de templado o hipertemplado (figura 2.5). La temperatura de dicho tratamiento es variable en función de la composición química y de las características mecánicas que se deseen alcanzar, variando entre los 455 y los 790 °C [35]

Son aceros inoxidables del Cr –Ni que contienen adicionalmente otros elementos de aleación como el cobre y aluminio que favorecen la precipitación de fases secundarias y elevan significativamente la dureza y resistencia mecánica del material cuando es sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento. Estos materiales ofrecen una alternativa para obtener una buena resistencia mecánica por medio de un tratamiento térmico a menor temperatura que puede ser aplicado incluso después de la fabricación de la pieza o elemento mecánico.

Las propiedades mecánicas (resistencia y dureza) que se pueden alcanzar con estas aleaciones son superiores inclusive a las obtenidas por los aceros inoxidables martensíticos [35], además de tener mayor resistencia a la corrosión que éstos últimos gracias a su mayor contenido de cromo. Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación pueden ser del tipo martensítico, semi-austeníticos y austeníticos.

Estos aceros ofrecen una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se desea asociar elevadas características mecánicas y de maquinabilidad. Además, se utilizan en aplicaciones muy específicas, sobre todo aeronáuticas, cuando se precisan altas prestaciones, como alternativa a las aleaciones de titanio.



Figura 2.5.- Estructura acero inoxidable endurecido por precipitación (PH) x 200 aumentos.

### **2.1.2. Proceso de fabricación de los aceros inoxidables**

Las características finales de los aceros inoxidables son consecuencia de la composición química y del proceso de producción llevado a cabo para su fabricación. Alteraciones en dicho proceso dan lugar a variaciones más o menos significativas en las propiedades de los mismos una vez se encuentran en el estado de suministro. Las distintas rutas de fabricación proporcionan a los materiales distintos acabados superficiales [59].

Una vez descritos los distintos tipos de aceros inoxidables, a continuación, se describe el proceso de fabricación general de la siderúrgica Acerinox Europa S.A.U. para los distintos formatos (chapas gruesas, bobinas, flejes y discos, principalmente).

El proceso de fabricación en Acerinox Europa S.A.U. presenta el siguiente esquema:

- Acería y colada continua.
- Laminación en caliente.
- Laminación en frío y líneas de acabado.

Cabe mencionar, como etapa previa a la acería, la recepción de chatarra de acero inoxidable principalmente (magnética y no magnética) mediante barcos y camiones, los distintos tipos de materias primas (ferroaleaciones) y los parques de almacenamiento de las mismas.

El proceso de producción se inicia en la acería, que está compuesta por tres hornos eléctricos de ultra-alta potencia (50-80 MW), dos convertidores AODs (Argon Oxygen Decarburization) y varias cucharas de trasvase y de colada. La fusión de las materias primas (chatarra y ferroaleaciones) se lleva a cabo en los hornos eléctricos, que tienen una capacidad entre 100-120 toneladas, y tres electrodos de grafito que funden el material mediante la generación de un arco eléctrico a partir del paso de la corriente eléctrica.

Una vez el acero se encuentra en estado líquido, se vuelca en una cuchara de transvase y se lleva al AOD en el que se ajusta el contenido de carbono hasta el valor objetivo mediante el soplado de una mezcla de oxígeno y gas inerte (Ar o N). El proceso en el AOD se compone de cuatro etapas:

- **Descarburación:** donde se alcanza el nivel deseado de carbono mediante diferentes fases de soplado de oxígeno y gas inerte (Ar o N) con una proporción determinada. En primer lugar se lleva a cabo la descarburación directa mediante una inyección mayor de oxígeno, produciendo que las fases restantes sean más pobre en oxígeno facilitando la descarburación indirecta, donde el carbono reacciona con los óxidos metálicos y favorece la formación de CO. Mediante este proceso se pasa de un contenido de carbono en torno a un 2% en peso a, aproximadamente, un 0,05% en peso (según el tipo de acero).
- **Reducción:** en la primera etapa de descarburación, además del carbono, también se oxidan parcialmente otros metales necesarios en la aleación, como, por ejemplo, el cromo. La etapa de reducción tiene como objetivo recuperar estos metales de su forma oxidada, mediante la adición de ferrosilicio, cal y espatofluor (fluoruro cálcico). La escoria resultante, formada

principalmente por silicatos cálcicos fluidificados por la acción del espatoflúor, y por cantidades discretas de óxidos no reducidos, se elimina mediante un volcado posterior. Los restos de oxígeno que quedan en el acero líquido, son eliminados mediante un soplado con gas inerte (Ar o N).

- **Desulfuración:** en la mayoría de los aceros, el azufre es un elemento perjudicial, por lo que es necesario su eliminación. El azufre está presente en el caldo formando principalmente inclusiones de sulfuros de manganeso, hierro y cobre, (tipo MnS). Para eliminar el azufre, se añaden cal, espatoflúor y algo de ferrosilicio. Estos productos reaccionan con los sulfuros presentes generando compuestos tipo CaS que dan lugar a la formación de la escoria. De este modo, se recuperan los elementos de aleación que formaban parte de los sulfuros.
- **Afino:** consiste en la adición final de ferroaleaciones que permiten alcanzar cuantitativamente la composición química deseada.

En el AOD se lleva a cabo un control de la composición química mediante la obtención de muestras, que posteriormente se mandan y analizan mediante los equipos adecuados del laboratorio de acería.

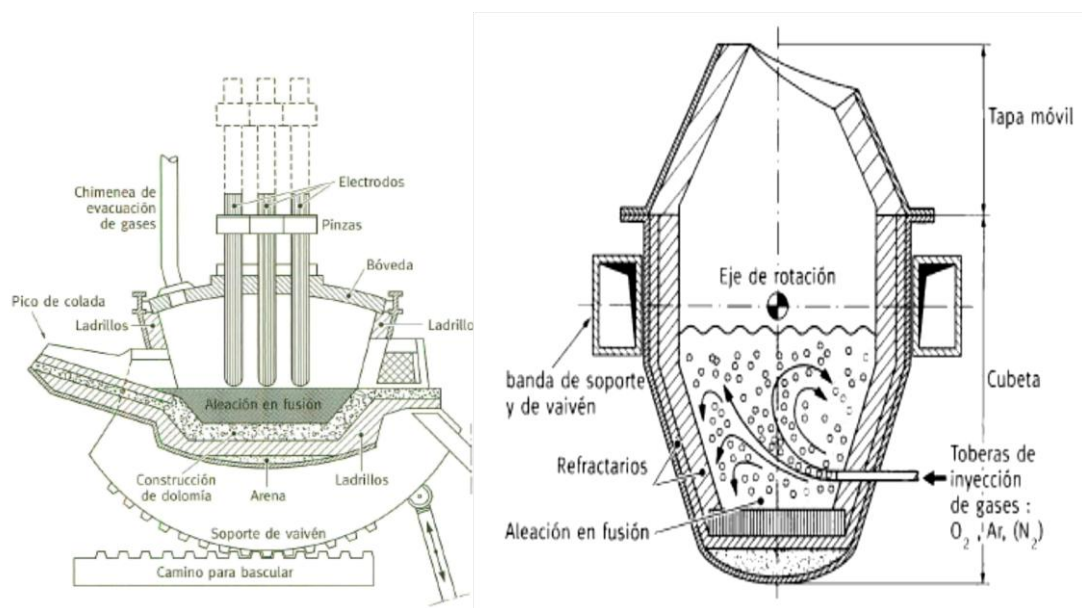


Figura 2.6.- Esquema del horno eléctrico (izda) y del convertidor AOD (dcha) [14].

Una vez comprobada que la composición química es la adecuada, el acero es trasvasado a una cuchara de colada donde el caldo es homogeneizado tanto en temperatura como en composición mediante el soplado de Ar. A continuación el acero líquido es llevado a un recipiente intermedio de acumulación denominado repartidor o *tundish*. En el *tundish* comienza la etapa de colada continua y consiste en un depósito cuya pared interior es de un material refractario con un recubrimiento para evitar que el caldo se adhiera: Además, posee un diseño adecuado de modo que el caldo queda orientado hacia el orificio de salida. En el exterior de este orificio se encuentra acoplada un conducto de material refractario, denominado buza, que conduce el acero líquido a la lingotera.

En la entrada de la lingotera se adicionan polvos de colada que evitan la adherencia del caldo en las paredes de la lingotera. La lingotera, donde el material empieza a solidificarse adoptando la forma de la misma, está abierta y refrigerada. En Acerinox Europa S.A.U., el espesor nominal es de 200 mm y los anchos nominales posibles son 1000, 1200 y 1500 mm. El acero necesita realizar un recorrido con una cierta curvatura para la correcta solidificación del desbaste, controlado mediante la acción de unos rodillos y con un cierto radio de curvatura para evitar la aparición de grietas. A continuación, se cortan los desbastes mediante un oxicorte a la longitud requerida (entre 4,5-12,5 m) y se marcan con su identificación correspondiente. La etapa de colada continua se representa esquemáticamente en la figura 2.7.

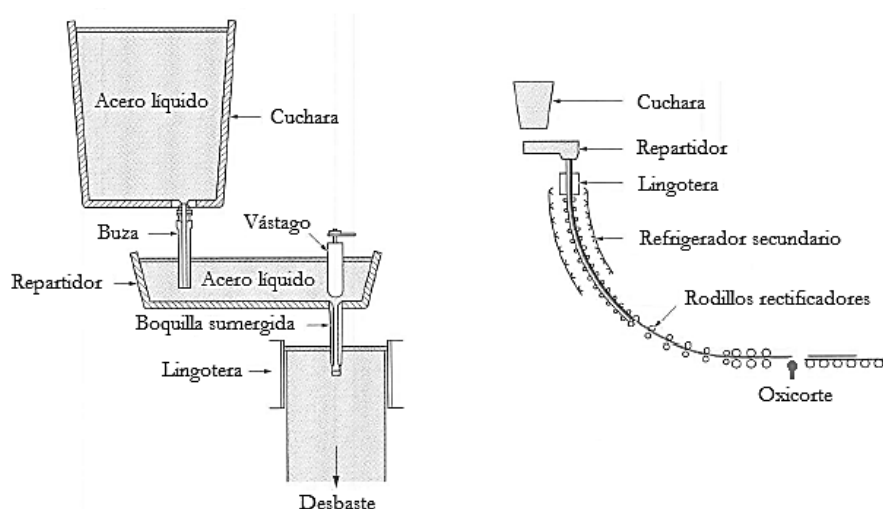


Figura 2.7.- Esquema de la colada continua de desbastes [14].



Acerinox Europa S.A.U. dispone de una segunda línea de colada continua, donde el producto final es en formato de palanquilla, con unas dimensiones de 200x200mm y una longitud aproximada de 7000mm). Las palanquillas están destinadas a la empresa filial Roldán S.A en cuyas instalaciones se fabrican distintos productos largos (trefilado, alambIÓN, corrugado, etc.)

Continuando con la fabricación de producto plano, el acero colado y solidificado presenta una capa externa de oxidación (cascarilla) creada por las altas temperaturas de proceso que, en muchos casos, ha de ser eliminada para garantizar la correcta calidad superficial final. Para la eliminación de la cascarilla y cualquier defecto superficial de las caras principales de los desbastes solidificados y enfriados, y su posterior inspección superficial, los desbastes se esmerilan mediante una muela rectificadora que se posiciona a distintos ángulos respecto al aje principal del desbaste.

La etapa de ***Laminación Caliente*** (figura 2.8) comienza con la entrada del desbaste en el horno de precalentamiento. La principal característica de este equipo es que está formado por un sistema de solera galopante que permite el desplazamiento del desbaste en el interior del horno con quemadores de gas natural. El horno se encuentra dividido en cuatro zonas: recuperación, precalentamiento, calentamiento e igualación. El objetivo del tratamiento es que el desbaste alcance la temperatura de inicio de laminación en toda su masa. La temperatura alcanzada es variable según el tipo de acero.

La salida del horno es la entrada del tren de laminación, compuesto por dos etapas: desbastador y acabador. El Desbastador (*Roughing Mill* o RM) es de tipo cuarto reversible. Esto indica que está compuesto por dos rodillos de trabajo y dos de apoyo. Esta instalación permite en la fabricación de bobinas, la reducción del desbaste de 200mm a unos 25-26mm mediante programas normalmente de siete pasadas. En esta etapa, se aplican chorros de vapor de agua para descascarillado. Además llevan instalados unos cilindros verticales, denominados canteadores, que ayudan a mantener el ancho objetivo de la pieza de trabajo.

El producto a la salida del RM se denomina barra de transferencia. La barra de transferencia entra al tren Acabador (*Finishing Mill* o *FM*) para continuar la laminación. El FM es un tren reversible de tipo Steckel con 6 rodillos, dos de trabajo y cuatro de apoyo. La principal característica de la configuración Steckel es que dispone de dos hornos bobinadoras alimentados por quemadores de gas natural y situados a cada lado de la caja de laminación, cuya función es la de mantener la temperatura de la banda entre las pasadas y confinar la creciente longitud que va alcanzando el material conforme va reduciendo su espesor durante la laminación. Mediante la aplicación de un programa normalmente de cinco pasadas se consiguen espesores entre 2,5-8mm según el espesor final objetivo para el caso de bobinas como producto final.

Tras el FM se dispone de un sistema de duchas de agua que permiten enfriar la banda de forma controlada, lo que es importante por razones metalúrgicas, para ajustar convenientemente la microestructura del material, facilitar el decapado posterior o para acortar los tiempos de espera hasta el proceso siguiente. A continuación, se encuentra la bobinadora donde se enrolla el material.

En el caso de chapa gruesa como producto final (espesor entre 10 y 50 mm), el modo de operación de los dos trenes y los programas de reducción son distintos a los que se acaban de describir. En este caso, el material laminado se corta en una cizalla de salida en largos de aproximadamente 12 m y pasa al taller de chapa gruesa o taller de plates para su acondicionamiento estructural y superficial.

En la figura 2.8 se representa el esquema de la etapa de laminación caliente.

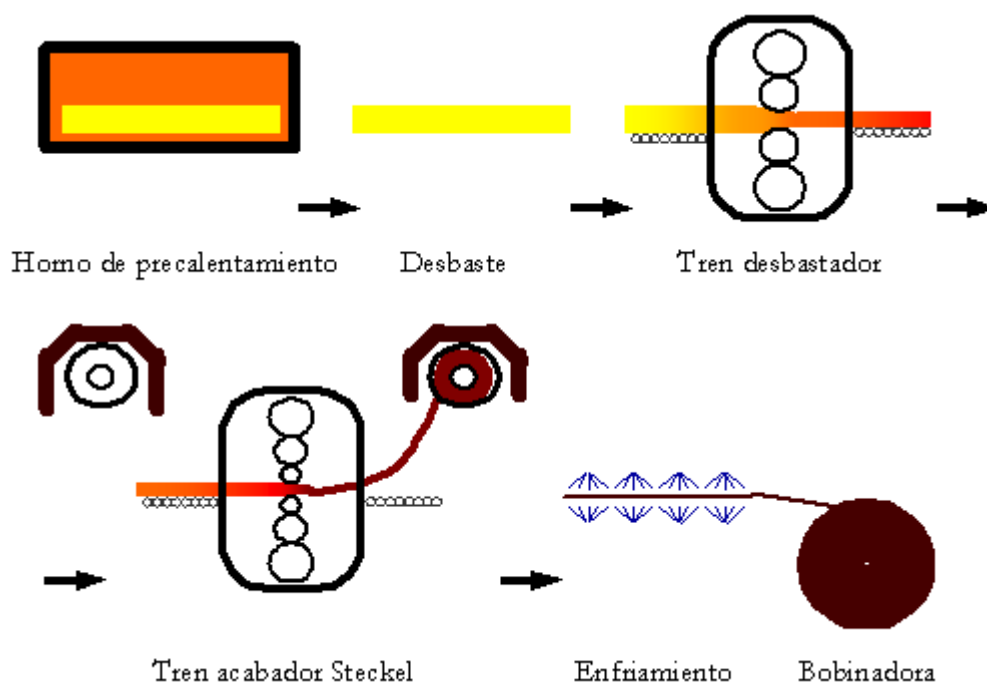


Figura 2.8.- Esquema etapa de laminación en caliente.

En el Taller de Plates, en primer lugar se aplica un tratamiento de recocido a la chapa para generar la estructura después de la laminación. A continuación se decapa y se corta mediante un oxicorte según las dimensiones exigidas por el cliente. Por último, se coloca sobre las mesas de inspección, se embala y se da salida.

Para la fabricación de bobinas, el siguiente paso consiste en la aplicación de un **tratamiento térmico de recocido y, a continuación, un proceso de decapado** en una de las líneas AP (*Annealing and Pickling*). El producto que se consigue a la salida de esta línea se denomina bobina con acabado 01. Esta bobina puede comercializarse como producto terminado o puede laminarse en frío.

La última etapa consiste en una **Laminación en Frío**. En Acerinox Europa existen 6 laminadores en frío Sendzimir (denominados ZM) compuestos por 20 cilindros en la caja de laminación cada uno con distinta funcionalidad (dos de trabajo, diez intermedios y ocho de apoyo) donde se aplican distintos programas de reducción según el espesor final (figura 2.9). Los dos cilindros de trabajo son los que se encuentran en contacto con la banda. Cada laminador tiene dos bobinadoras a ambos

lados. Este equipo está lubricado para alargar la vida útil de los cilindros y refrigerar los mismos, conseguir que el material se deforme con fluidez y eliminar el calor producido en la deformación.

Los espesores finales que pueden llegar a alcanzarse son entre 0,25-6mm con unos programas de reducción entorno al 70-80% entre 10-12 pasadas.

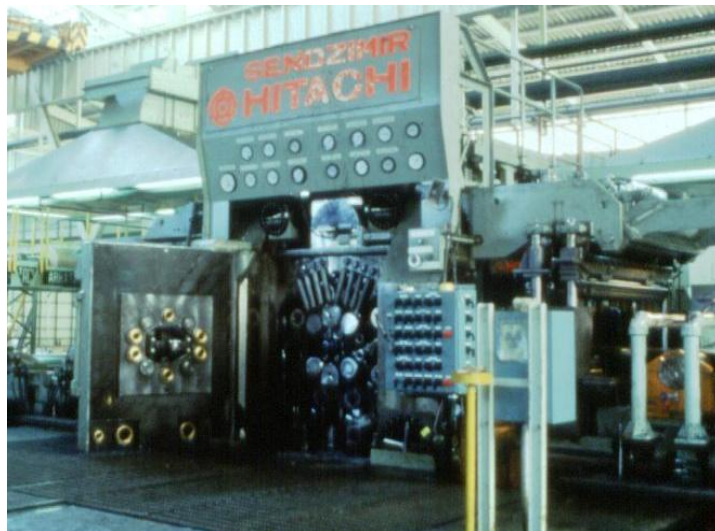
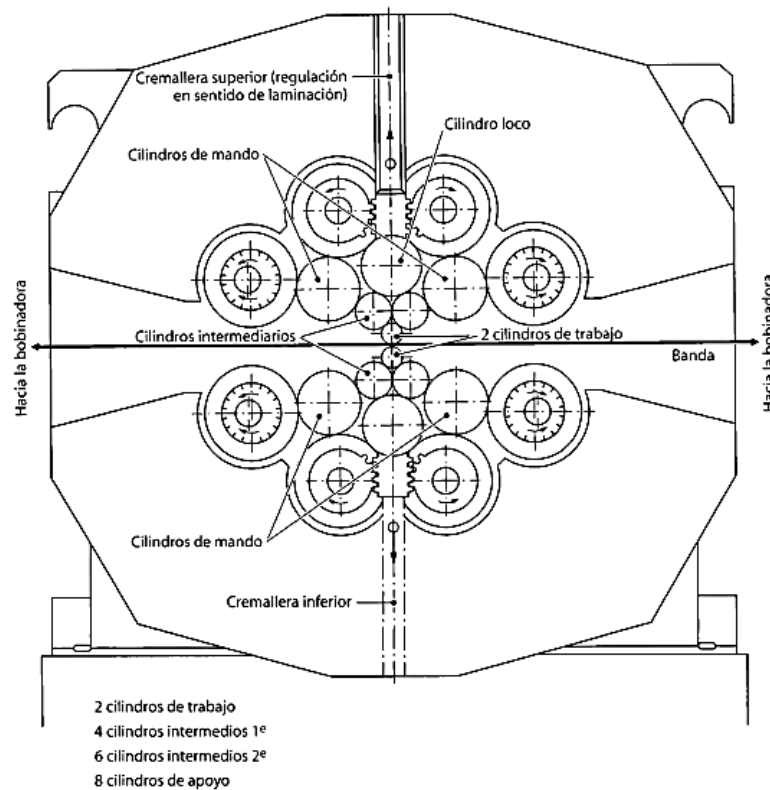


Figura 2.9.-Esquema disposición rodillos y Laminador Sendzimir (ZM) [14]

Una vez laminada la bobina pasa por las líneas de recocido y decapado finales para recuperar la microestructura distorsionada tras la deformación. En función del acabado que se requiera, la bobina de frío pasará por una línea AP (Annealing and Pickling) o una línea BA (Bright Annealing o recocido brillante). La línea AP (figura 2.10) consiste en un horno horizontal donde se aplica un tratamiento de recocido, unos baños de ácidos de decapado para eliminar la cascarilla y un tren de laminación de piel (*skin pass*). Al final de estas tres etapas, el material presenta el acabado denominado 2B. La línea BA (figura 2.11) está compuesta por un horno vertical con atmósfera inerte controlada de  $\text{NH}_3$  disociado para evitar la oxidación de la superficie y su consiguiente formación de cascarilla, con el que se consigue una bobina con acabado brillante denominado 2R o BA.



Figura 2.10.- Línea de recocido y decapado (AP)



Figura 2.11.- Bucle de entrada al horno de recocido brillante (BA)

Por último, el producto final es procesado por las líneas de corte (corte longitudinal, corte transversal, etc.) correspondientes al taller de acabados según las especificaciones de cada pedido. De este modo se obtienen los diferentes productos finales requeridos en los distintos formatos disponibles, como pueden ser flejes, discos, chapas, etc. Por último, pasan por las líneas de embalado y expediciones antes de enviarlas a su cliente de destino.

### **2.1.3. Aceros inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío.**

Los aceros inoxidables, prácticamente en cualquier aplicación, suponen una importante mejora en cuanto a durabilidad y características mecánicas, existiendo distintos compromisos de prestaciones en función de las condiciones de servicio.

Los aceros inoxidables en estado de recocido presentan una microestructura recrystalizada homogénea que permite el balance de propiedades mecánicas, de ductilidad, y frente a la corrosión, que los hace convenientemente fabricables y especialmente aptos para numerosas aplicaciones.

Del amplio abanico de usos y tipos de aceros inoxidables, cuando se trata de aplicaciones estructurales, la familia de los aceros austeníticos presenta un potencial considerable. Esta circunstancia se deriva de la elevada capacidad de estos aceros para endurecerse por deformación plástica. Los aceros endurecidos se eligen por su alto límite elástico.

Las ***principales características*** de los aceros endurecidos por deformación son:

- Dureza elevada.
- Aumento de la resistencia a la carga de rotura.
- Aumento del límite elástico.
- Gran disminución del alargamiento.

### 2.1.3.1. Fenómeno de endurecimiento por deformación

- **Definición de acritud:** es un fenómeno de endurecimiento o fragilidad que experimentan algunos metales al ser trabajados en frío.

La acritud, provocada por la deformación en frío de los aceros austeníticos, causa un endurecimiento mayor que el que aparece en los otros aceros con el mismo tipo de deformación.

- **Definición de endurecimiento por deformación:** es el incremento de tensión en un material cuando se somete a una operación de deformación. De este modo, se aumenta la interacción de dislocaciones entre sí provocando un mayor número de deslizamientos. [3] [27] [43] [21]

El fenómeno de endurecimiento por deformación plástica se produce por la acción de unos mecanismos complejos de transformación de la austenita en martensita ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ) y por la propia solución sólida, teniendo lugar preferentemente uno u otro mecanismo en función de la estabilidad de la austenita. El grado de estabilidad aumenta con el nivel de aleación. [12]

Las leyes constitutivas de la deformación plástica describen la relación entre los parámetros básicos de la deformación a una temperatura dada, las características del material y la microestructura. La transformación martensítica es un fenómeno peliagudo que puede verse influenciado por el efecto de diversos factores como la composición del acero, su estructura inicial, la tensión, la velocidad de la deformación y la temperatura. [12]

Los parámetros más importantes son:

- Mecanismos de deformación
- Temperaturas de transformación martensítica (estabilidad de la austenita)
- Influencias de las tensiones en la formación de martensita

### a) Mecanismos de deformación de la transformación martensítica

La causa del gran endurecimiento que experimenta los aceros austeníticos endurecidos por deformación en frío se debe generalmente por la presencia de martensita, debido a los mecanismos de endurecimiento que experimenta para su formación. [29]

- **Definición de transformación martensítica:** Se trata de un tipo de transformación básica, donde la fase austenita se transforma sin difusión en martensita, a partir de la energía libre producida por la diferencia química existente entre las dos fases.[11]

La transformación martensítica consiste en un desplazamiento cortante de átomos muy similar al maclaje, con la salvedad de que el producto de transformación posee una estructura diferente a la fase original. Dependiendo de la morfología y del modo de transformación puede formarse dos tipos de martensita:  $\epsilon$  y  $\alpha'$ . La fase original, *austenita* ( $\gamma$ ), es una red cristalina cúbica centrada en las caras (FCC- *Face Centered Cubic*) y el producto de transformación, *martensita*, puede ser martensita- $\alpha'$ , fase magnética tetragonal centrada en el cuerpo (BCT- *Body Centered Tetragonal*) o martensita- $\epsilon$ , fase no magnética hexagonal compacta (HCP-*Hexagonal Close-Packed*). [11]

La fase martensita- $\epsilon$  está íntimamente relacionada con la energía que se produce a partir de las irregularidades que se producen en el apilamiento de átomos en un cristal y solo puede detectarse mediante técnicas de difracción. Esta fase va a formarse en los límites de grano de la austenita transformada.

Algunas investigaciones indican que la fase martensita- $\epsilon$  es una formación intermedia de la martenista-  $\alpha'$  y otras dicen que es un producto de una fuerza generada en la transformación  $\gamma \rightarrow \alpha'$ . En la figura 2.12, Dash y Otte resumieron las distintas posibilidades de formación de fases en la transformación  $\gamma \rightarrow \alpha'$ .



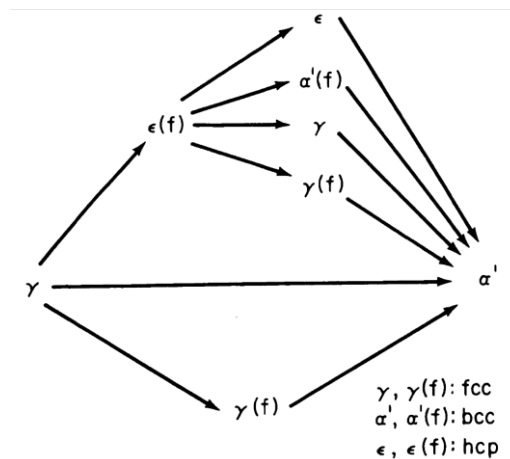


Figura 2.12.- Varias rutas hipotéticas de formación de martensita-  $\alpha'$  a partir de  $\gamma$  [15]

La transformación martensítica característica en un acero inoxidable se produce a partir de una deformación producida mediante una fuerza o tensión cortante sin difusión, durante el enfriamiento rápido de la austenita [23]. De este modo, la red cristalina FCC se reacomoda en una red tetragonal BCT. Debido a la alta velocidad de deformación, no provoca ningún cambio en la composición del material.

La fuerza generadora de esta deformación puede ser de tracción o compresión perpendicular al “plano de hábito” y llega a originar una pequeña distorsión [11] y [29]. Aunque realmente no se conocen los movimientos relativos de los átomos en la intercara, Wechsler, Lieberman y Read mantienen que la transformación martensítica de la estructura cristalográfica puede explicarse como el resultado de la acción de tres deformaciones.

**1º Deformación- Distorsión de Bain:** Justifica la red de la fase martensítica pero no la del plano de hábito exento de deformación. En esta etapa no se produce distorsión por lo que se mantiene la misma orientación en el plano. [11]

**2º Deformación- Cizallamiento de la estructura de Bain:** Da lugar al plano de hábito no deformado pero con orientación espacial distinta entre la red inicial y la red transformada. [11]

**3º Deformación-** Rotación de la estructura anterior para lograr que el plano de hábito tenga la misma orientación en ambas redes. [11]

A partir de estas tres deformaciones (figura 2.13) el núcleo de austenita se expande en una región completa del cristal, donde cambia de orientación y de estructura, produciendo una deformación cortante y una expansión de volumen. Este cambio de forma y tamaño provoca una deformación plástica en el material, a un lado de la placa transformada, que eleva la densidad de dislocaciones y produce el endurecimiento por deformación. El cambio de orientación también puede llegar a producir un relieve, cuando la martensita se forma cerca de una superficie libre.

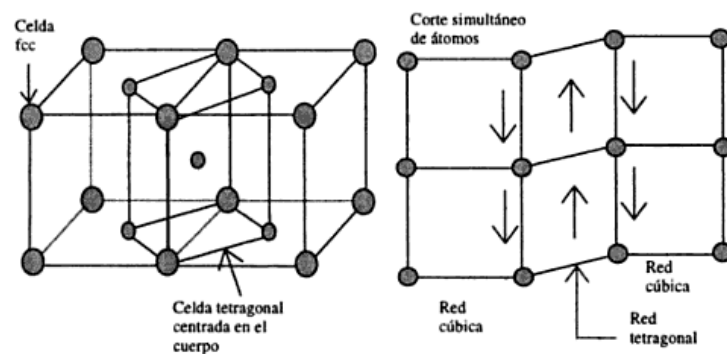


Figura 2.13.- Mecanismo de transformación martensítica de un acero (*Distorsión de Bain*) [27]

A nivel microscópico, la martensita puede visualizarse como una serie de placas alternadas de austenita con alta densidad de dislocaciones, y de martensita (similar a una macla), con estructura tetragonal. Aunque en el análisis microestructural lo que en realidad se observa son las zonas donde hubo transformación y las regiones de austenita que no transformaron.

Las estructuras de la martensita se clasifican según su apariencia en: agujas, placas y lenticulares, tal como puede observarse en la figura 2.14.

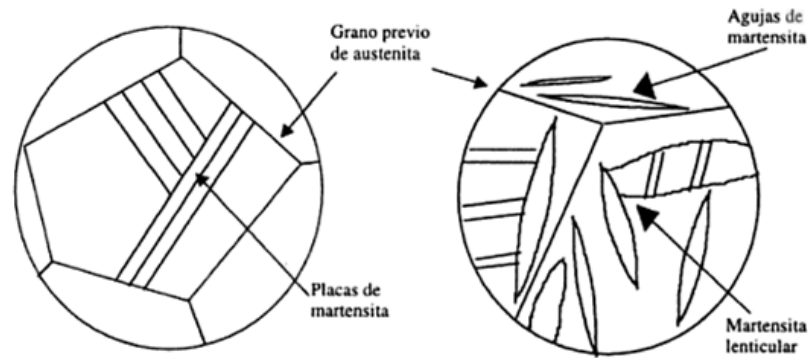


Figura 2.14.- Estructura martensítica [27]

#### b) Temperaturas de transformación martensítica (Estabilidad de la austenita)

Normalmente la martensita se forma cuando se recuece por debajo de la temperatura de equilibrio, separando los rangos de estabilidad en dos fases. Por debajo de esta temperatura, la energía libre de Gibbs del material disminuye cuando el material cambia de fase desde una estructura estable a otra que se estabiliza a temperaturas más bajas. La diferencia de temperatura es la principal fuerza impulsora de la transformación y va a depender de la estabilidad de la austenita. [11]

Para caracterizar la estabilidad de la austenita frente a la transformación martensítica de los aceros inoxidables austeníticos se utilizan, generalmente, dos criterios [14]:

- **Temperatura  $M_s$ :** temperatura a la que comienza espontáneamente la transformación austenita en martensita. Existen varias fórmulas para su cálculo, entre ellas las de Eichelman y Hull [16] para el  $M_s$  (Ec 2.1) expresada en °C.

$$M_s = \{75(14,6 - \%Cr) + 110(8,9 - \%Ni) + 60(1,33 - \%Mn) + 50(0,47 - \%Si) + 3000[0,068 - (\%C + \%N)]\} - 32 \left(\frac{5}{9}\right) \quad (2.1)$$

- **Temperatura  $M_{d30}$ :** temperatura a la que el 50 % de la estructura se ha transformado en martensita después de una deformación del 30 %. Esta temperatura se calcula a partir de varias fórmulas, entre ellas las de Angel [16] y [2] y Nohara [37] para el  $M_{d30}$  (Ecs 2.2 y 2.3), expresadas en °C. La ec 2.3 incorpora un término GS que es el tamaño de grano (*Grain Size*) en valor de índice G, según norma ASTM E-112 [6].

$$M_{d30} = 413 - 462(C + N) - 9,2(Si) - 8,1(Mn) - 13,7(Cr) - 9,5(Ni) - 18,5(Mo) \quad (2.2)$$

$$M_{d30} = 551 - 462(C + N) - 9,2(Si) - 8,1(Mn) - 13,7(Cr) - 29(Ni) - 18,5(Mo) - 29(Cu) - 68(Nb) - 1,42(GS - 8) \quad (2.3)$$

Además, en términos de transformación  $\gamma \rightarrow \alpha'$  se han desarrollado algunas relaciones entre la estabilidad de la austenita y la composición química. Cabe mencionar, que todos los elementos de aleación proporcionan un incremento de la estabilidad de la austenita, disminuyendo las temperaturas de transformación. Algunas de estas relaciones son:[15]

- **Factor de estabilidad  $\Delta$ :** indica cuando una aleación resistiría la transformación para enfriamientos superiores del 80%. Este factor se calcula mediante la ecuación desarrollada por Post y Eberly (ec 2.4). Para valorar el comportamiento de la composición frente al endurecimiento por deformación en frío, Griffiths y Wright desarrollaron una nueva relación con la incorporación del cobalto y el nitrógeno (ec 2.5)

$$\Delta_{POST-EBERLY} = Ni - \left( \frac{Cr + 1,5Mo - 20}{12} - 0,5Mn - 35C + 15 \right) \quad (2.4)$$

$$\Delta_{GRIFFITHS-WRIGHT} = Ni - \left( \frac{Cr + 1,5Mo - 20}{12} - 0,5Mn - 35C - Cu - 27N + 15 \right) \quad (2.5)$$

Por otro lado, teniendo en cuenta la transformación  $\gamma \rightarrow$  martensita- $\epsilon$ , existen dos temperaturas menos comunes denominadas  $E_d$  y  $E_s$ .

- **Temperatura  $E_d$ :** se define como la temperatura máxima a la que se transforma la martensita  $\epsilon$  mediante una deformación inducida.
- **Temperatura  $E_s$ :** se define como la temperatura donde la transformación  $\gamma \rightarrow \epsilon$  se produce de forma espontánea.

### c) Influencia de las tensiones en la formación de martensita

Dado que la formación de martensita involucra un cambio de forma en un volumen finito, la tensión aplicada puede influir en la reacción. La formación de placas de martensita se origina a partir de unos mecanismos de deslizamiento y de maclado provocados por unos esfuerzos multiaxiales de tensión y de cizalladura (figura 2.15).

El *deslizamiento por dislocaciones* (figura 2.15- a), es el mecanismo de deformación más usual en metales. Este mecanismo ocurre cuando se aplica una fuerza cortante sobre un metal, y al llegar al estado crítico provoca que los átomos se deslicen a lo largo del plano de deslizamiento originando que el movimiento de la dislocación produzca un escalón en la superficie del metal o banda de deslizamiento, deformándose plásticamente.

El mecanismo de *deformación por maclado* (figura 2.15- b) sucede en un plano a través del cual hay una desorientación especial de la imagen especular de la estructura cristalina. Las maclas pueden producirse cuando una fuerza cortante, que actúa a lo largo del límite de macla, hace que los átomos se desplacen de su posición. El maclado sucede durante la deformación o el tratamiento térmico de ciertos materiales [26]

Una macla es un tipo especial de límite de grano a través del cual existe una simetría de red especular, es decir, los átomos de un lado del límite son como imágenes especulares de los átomos del otro lado. Existen dos tipos de maclas: de deformación (resultados de la deformación y causantes del endurecimiento) y de recocido [63]. Los límites de macla interfieren con el proceso de deslizamiento y aumentan la resistencia

del metal. El movimiento de los límites de macla también puede causar la deformación del metal.

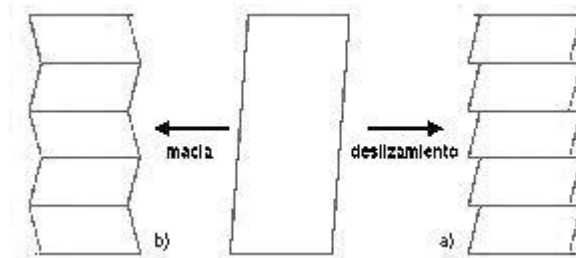


Figura 2.15.- Formación de placas de martensita: a) deslizadas, b) macladas

La formación de placas de deslizamiento sólo requiere la existencia de tensiones cortantes, y la formación de placas macladas requiere además, la existencia de tensiones axiales. Si la tensión de cizalladura aplicada tiene la misma dirección que la tensión de transformación, la tensión de cizalladura ayudará a la formación de la martensita. Las transformaciones martensita-  $\epsilon \rightarrow$  martensita-  $\alpha'$  y  $\gamma \rightarrow$  martensita-  $\alpha'$  se mejoran con tensiones de tracción.

Un aumento de la tensión interna aumenta la deformación plástica y favorece la nucleación de la martensita. Existe una relación entre la temperatura de formación de martensita y la tensión inducida de formación de martensita de tipo  $\epsilon$  y  $\alpha'$ . [11]

La formación de martensita también puede verse afectada por operaciones mecánicas o tratamientos termomecánicos. Durante una deformación mecánica inducida, las transformaciones de  $\gamma \rightarrow$  martensita-  $\epsilon \rightarrow$  martensita-  $\alpha'$  consiguen una nucleación térmica de la martensita-  $\alpha'$  mediante un envejecimiento superior a 400°C. [11]

### 2.1.3.2. Proceso de fabricación de los aceros con acabado endurecido

Los aceros endurecidos por deformación en frío fabricados en las instalaciones de Acerinox Europa S.A.U. se designan según la norma americana ASTM A666 *“Standard Specification for Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar”* [4]. Esta norma recoge los requisitos y las condiciones de los aceros inoxidables austeníticos en estado de recocido y distintos grados de endurecimiento por deformación en frío aptos para varias aplicaciones.

En concreto, Acerinox Europa S.A.U. incluye en su catálogo de productos cuatro grados de endurecimiento:  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  y completamente duro. La diferencia entre ellos es la variación del rango de valores de resistencia a la tracción correspondiente a cada acabado (según la norma ASTM 666 [4]), y por consiguiente la aplicación de una reducción distinta en la segunda laminación en frío en función del grado de endurecimiento a conseguir, tal como se describe a continuación.

El acabado endurecido consiste en aplicar al material una segunda laminación en frío no seguida de recocido para aumentar sus prestaciones. Este acabado se aplica mayoritariamente a aceros austeníticos, pero también en algún caso a ferríticos. Las bobinas con acabado de frío, es decir, una vez laminada en el ZM, recocida y decapada por una línea AP, vuelve a laminarse por segunda vez en el ZM para que, mediante una o dos reducciones, se aumenten las propiedades mecánicas. A continuación se lleva a las líneas de desengrase para eliminar los restos de lubricante sobre la superficie y por último a las líneas de acabado.

Las condiciones del proceso de fabricación se eligen en función de los requerimientos del pedido. No obstante, estos materiales están certificados según la norma americana ASTM 666 [4]. Normalmente, las exigencias a los aceros endurecidos son un aumento de dureza y de resistencia a la tracción. Estos pedidos se adaptan a las curvas de laminación de temple disponibles en las instalaciones de Acerinox Europa S.A.U. y se realizan los distintos programas de reducción según el

tipo de acero, espesor de partida y espesor final, bajo distintos códigos de pedidos especiales.

El esquema del proceso de fabricación de los aceros austeníticos endurecidos por deformación en frío en Acerinox Europa S.A.U. es el mostrado en la figura 2.16:

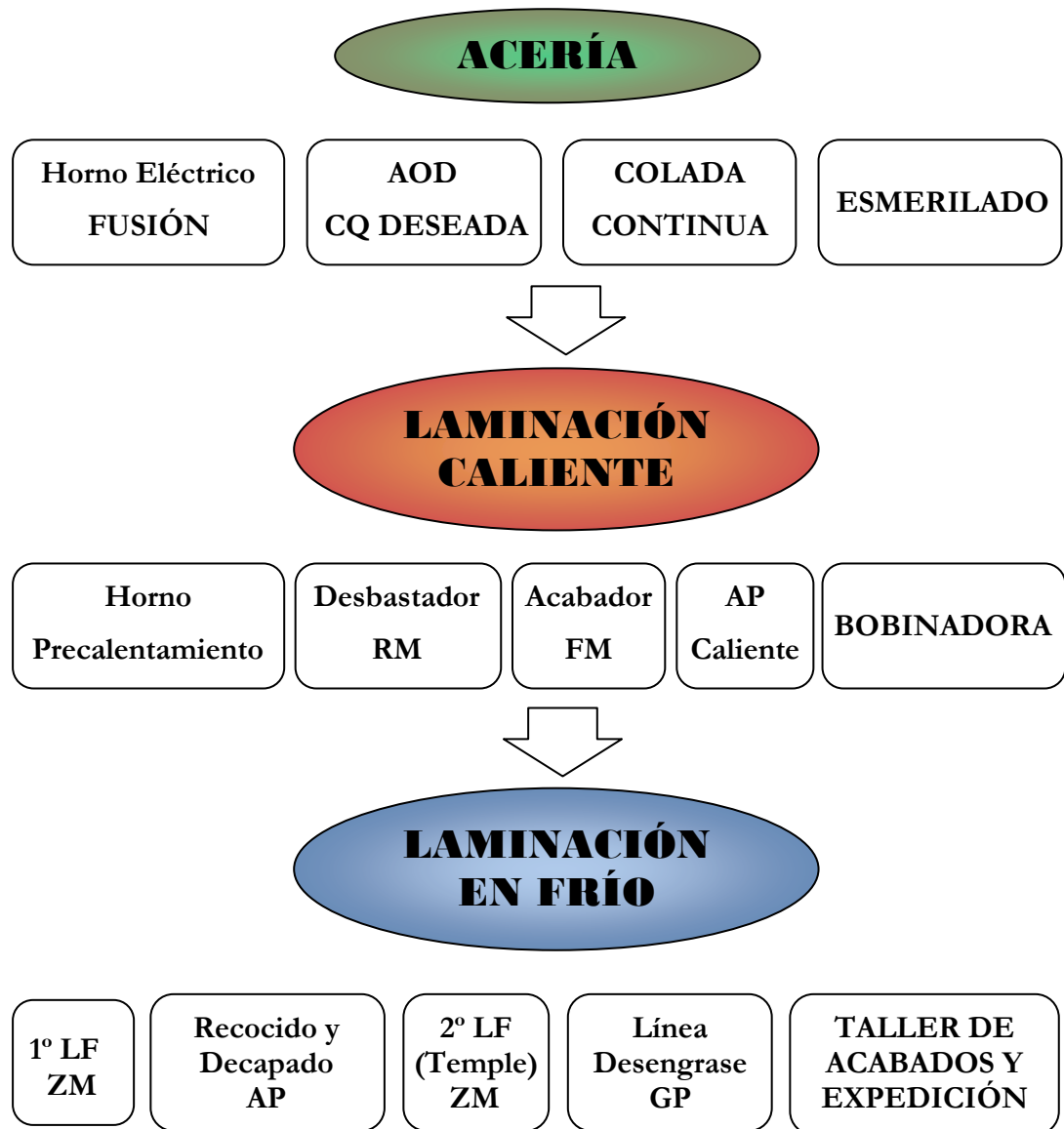


Figura 2.16.- Esquema productivo de aceros inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío.



Cabe destacar en el proceso de fabricación de estos aceros, el proceso de temple en el ZM, en el cual se establece el programa de reducciones y número de pasadas. Por consiguiente, para cada espesor se establece un programa diferente en el laminador. En la figura 2.17 se observa la curva de temple empleada un acero EN 1.4301 o AISI 304, mediante la cual se establece el porcentaje de reducción necesario para la segunda laminación en frío en función de la dureza solicitada. Para reducciones mayores o iguales al 18% se aplican dos pasadas, y para reducciones menores al 18% se aplica una pasada

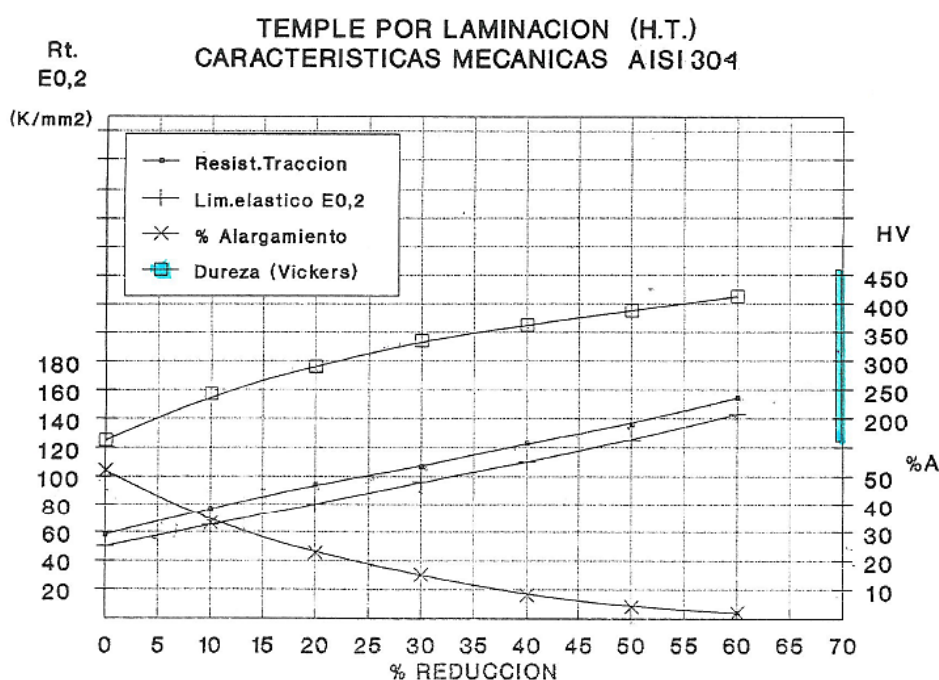


Figura 2.17.- Curva de temple para un acero EN 1.4301 o AISI 304 [20]

### 2.1.3.3. Aplicaciones de aceros inoxidable con acabado endurecido

Los aceros austeníticos endurecidos por deformación en frío, gracias a sus altas propiedades mecánicas, son adecuados para aplicaciones estructurales en el sector de la construcción, donde la exigencia de un alto límite elástico y una alta resistencia a la tracción, combinado con una alta resistencia a la corrosión, son necesarias. Estos aceros se utilizan en puentes y estructuras expuestos a ambientes moderados o

agresivos, recipientes a presión, magnetismo, criogénicos y resistentes a altas temperaturas.

Además, estos aceros se emplean en algunos mercados en el sector del automóvil. Gracias a la combinación de su alta resistencia y su buena conformabilidad hace adecuados a estos aceros para la fabricación de estructuras de automóvil, a partir de operaciones de estampado.

En Acerinox Europa S.A.U. se fabrica este tipo de aceros generalmente para las siguientes aplicaciones:

- Barriles de cerveza: el material endurecido por deformación en frío se utiliza en la base inferior de soporte y en el asa para su traslado.
- Ollas de presión: se emplea en la zona central de la tapadera donde se ajusta para crear el vacío y la zona de agarre con la olla.
- Eslabones de cintas transportadoras: para asegurar el máximo factor de seguridad frente a las tensiones continuas de las condiciones de servicio de la misma.
- Equipamiento industrial: Prensas y dobladoras automáticas, estampadoras en frío, tratamientos térmicos
- Intercambiadores para el tratamiento de aguas
- Abrazaderas para altas presiones.

## **2.2. Normativa aplicable para los aceros inoxidable endurecidos por deformación en frío de uso estructural.**

Los aceros inoxidable se han utilizado para aplicaciones estructurales gracias a su resistencia a la corrosión y a sus propiedades de resistencia a la tracción, a la fatiga y tenacidad. Tanto los dúplex como los austeníticos endurecidos son los materiales más adecuados en estas aplicaciones.

Los austeníticos presentan una buena combinación de resistencia a la corrosión, conformabilidad y propiedades de fabricación. Los aceros dúplex son adecuados gracias a sus altas prestaciones mecánicas que la proporción 50/50 ferrita/austenita y a su contenido de N. Sin embargo, los austeníticos endurecidos por deformación en frío llegan a igualar y a superar ampliamente las propiedades mecánicas de los dúplex.

En Europa se ha desarrollado recientemente una normativa que recoge los requisitos de las propiedades más adecuadas de los aceros inoxidable para el diseño de estructuras en el sector de la construcción. Se trata de la norma EN 1993-1-4 que proporciona bajo un único documento las pautas necesarias para el diseño de edificios y obras civiles desde el punto de vista de la seguridad y vida de la estructura. [9]

Por otro lado, cabe mencionar que las exigencias de las propiedades mecánicas y físicas de los aceros inoxidable utilizadas para el diseño estructural se recogen en la norma EN 10088 partes 4 (producto plano) y 5 (producto largo).

Uno de los objetivos de este TFC es aportar información mediante los resultados obtenidos a partir del programa de ensayos realizado, a la normativa actual a nivel europeo y español de diseño estructural UNE-EN 1993-1-4 de aceros inoxidable.

Esta parte 1.4 de la Norma UNE-EN 1993 ofrece especificaciones adicionales para proyectos de estructuras de acero para edificios y obra civil que amplían y modifican la aplicación de las Normas EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-5 y EN 1993-1-8 a aceros inoxidable austeníticos, austenítico-ferríticos y ferríticos. A su vez, está

basada en cuanto a propiedades mecánicas, en la norma UNE-EN 10088, que hace referencia a las especificaciones del acero inoxidable para uso estructural. La norma UNE-EN 1993 pertenece al conjunto de normas llamada Eurocódigos.

### 2.2.1. Eurocódigos

Los eurocódigos son una serie de 10 normas europeas compuestas a su vez por varias partes cada una, creadas para unificar a nivel europeo las normas de diseño de cálculo estructural en construcción (aspectos geotécnicos, diseño de estructuras frente al fuego, etc.), para favorecer la competencia en este sector e impedir barreras técnicas dentro de la CEE y aportar niveles de seguridad uniformes en la construcción a nivel europeo.

Son el medio recomendado para dar conformidad sobre los requisitos esenciales de la Directiva de Productos de Construcción para las obras de construcción y productos que llevan la marca CE. La Directiva 2004/18/EC establece que los Eurocódigos son obligatorios para las obras de contratación pública [32].

Las **normas** [32] que forman los eurocódigos son:

- EN 1990- Eurocódigo: Base de diseño estructural
- EN 1991- Eurocódigo 1: Acciones en estructuras
- EN 1992- Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón
- EN 1993- Eurocódigo 3: Diseño de estructuras de acero
- EN 1994- Eurocódigo 4: Diseño de estructuras de mixtas de hormigón y acero
- EN 1995- Eurocódigo 5: Diseño de estructuras de madera
- EN 1996- Eurocódigo 6: Diseño de estructuras de albañilería
- EN 1997- Eurocódigo 7: Diseño geotécnico
- EN 1998- Eurocódigo 8: Diseño de estructuras de resistencia a terremotos
- EN 1999- Eurocódigo 9: Diseño de estructuras de aluminio

Los **principales conceptos** que se contemplan en los eurocódigos son:

- Requisitos fundamentales para el diseño desde el punto de vista de la seguridad, utilidad, fuego y robustez.
- Adopción de diferentes niveles de confiabilidad para resistencia mecánica y utilidad.
- Diseño de la vida útil (análisis de ciclo de coste, estrategias de mantenimiento, etc.)
- Durabilidad.
- Aseguramiento de la calidad.

### **2.2.2. Eurocódigo 3- EN 1993**

El eurocódigo 3 se aplica al diseño de edificios y otras construcciones civiles de acero. Esta norma aporta los principios y los requisitos necesarios para asegurar la seguridad y funcionalidad de las estructuras, la base del diseño y la verificación de que se dan en la norma EN 1990 - Bases de diseño estructural. El Eurocódigo 3 se refiere a los requisitos de resistencia, facilidad de mantenimiento, durabilidad y resistencia al fuego de las estructuras de acero.

El Eurocódigo 3 es el eurocódigo de mayor alcance gracias a la gran diversidad de estructuras a partir de acero inoxidable disponibles, la necesidad de cubrir aplicaciones como pueden ser uniones soldadas y soldaduras y otorgar a la estructura un cierto grado de esbeltez. EN 1993 cuenta con alrededor de 20 partes que abarcan normas comunes, de diseño de resistencia al fuego, puentes, edificios, tanques, silos, tuberías, grúa apoyada en estructuras, torres y castilletes, chimeneas, etc

El Eurocódigo 3 está destinado a ser utilizado en conjunto con:

- EN 1990.
- EN 1991.
- EN, ETAGs y ETAs para productos de construcción relevantes para estructuras de acero.

- EN 1090, la cual aporta requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero.
- EN 1992 y EN 1999 cuando en dichas normas se hace referencia a las estructuras y componentes de acero.

En el Anexo B de esta norma se incluyen los requisitos de diseño de estructuras a partir de aceros endurecidos por deformación. Las exigencias de esta norma se basan en gran medida en las de la UNE-EN 10088, donde se establecen los rangos de composición química, rutas de proceso y acabados, propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento, dureza, resiliencia) y resistencia a la corrosión intergranular, para los distintos tipos de acero en estado de recocido clasificados según la familia.

Para los acabados endurecidos por deformación en frío, denominados “2H” según esta norma, existe otro grupo de tablas que recogen de forma independiente los rangos de los valores de resistencia a la tracción y los correspondientes al límite elástico. Por lo que dicha norma no contempla la relación entre un valor de resistencia a la tracción y su análogo límite elástico, como ocurre en el resto de los tipos de aceros.

Por último, cabe mencionar la existencia de un grupo de evolución encargado de la actualización de los eurocódigos. Este grupo está formado por especialistas procedentes de organismos de diversos países europeos, entre los que se encuentra la empresa Acerinox Europa S.A.U. Estas revisiones, incluyen actualizaciones de datos relacionados con aceros existentes o especificaciones para nuevos aceros y aplicaciones, así como revisiones de los parámetros incluidos en la norma.

### 2.3. Conformabilidad de los aceros inoxidables

Las operaciones de conformado pueden relacionarse en función de la **temperatura** como proceso de *conformado en caliente* (donde el material sufre una deformación plástica a una temperatura mayor que la de recristalización) y proceso de *conformado en frío* (deformación provocada por un esfuerzo superior al esfuerzo de fluencia original a temperatura ambiente); y en función de la **geometría del material**, como *conformación masiva* (materiales con grandes dimensiones sufren un notable incremento en la relación superficie-volumen, mediante operaciones de forja o extrusión) y *conformación de chapa*, donde una de las dimensiones es muy inferior a las demás (deformación plástica del material mediante operaciones de estirado o embutición)

Los factores que afectan a la aplicación de una operación de conformado son:

- Propiedades mecánicas del material
- Fricción en intercara chapa/herramienta
- Temperatura y velocidad de operación
- Distribución de deformaciones

Tras la aplicación de una operación de conformado los factores más relevantes a evaluar son:

- Las cargas previstas tras el ensayo.
- Ausencia de grietas y de arrugas
- Adelgazamiento del material
- Correcto acabado superficial.

- **Definición de la conformabilidad:** es la capacidad de un material a ser deformado mediante procesos como embutición profunda, flexión, laminación, etc. Es mayor cuanto mayor sea la capacidad para estar en condiciones de deformación plástica sin fractura.[30]

Para garantizar el correcto comportamiento de un material ante operaciones de conformación, existe una serie de ensayos que proporcionan los resultados para el estudio de la **conformabilidad** de un material.

Las operaciones de conformación producen en el material una deformación plástica mediante un adelgazamiento localizado y posterior cambio de forma a temperatura ambiente. Los materiales metálicos pueden ser deformados sólo hasta un cierto nivel antes de que aparezca un adelgazamiento o estricción y posterior rotura, de forma que dependerá de la combinación de las deformaciones impuestas. En el caso del conformado de chapas metálicas (productos planos), las deformaciones se suelen medir en el plano de la chapa, dado que las variaciones en el espesor son difíciles de medir con precisión.

### 2.3.1. Doblado y recuperación elástica

El **doblado** es una deformación muy común en operaciones de conformado. El ensayo de doblado, determina la aptitud de un material a la deformación plástica por doblado. Consiste en someter a una probeta a una deformación plástica por flexión mediante la acción de un punzón, sin inversión del sentido de la fuerza durante el ensayo, hasta un ángulo de doblado especificado. El eje longitudinal de la probeta se mantiene perpendicular al eje de doblado (figura 2.18).

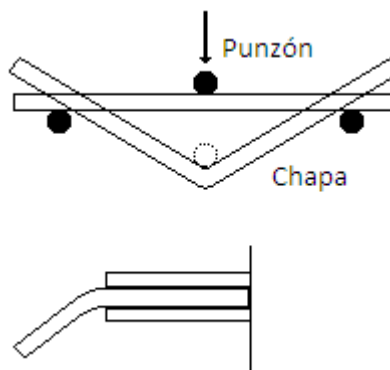


Figura 2.18.- Esquema de algunas operaciones de doblado



Si tras el doblado no se observan grietas en la superficie del lado convexo de la pieza doblada, el material es apto.

Otro parámetro a considerar tras la aplicación de una fuerza mediante un punzón, es la **recuperación elástica del material o *Springback***.

- **Definición Springback:** es una propiedad que evalúa la recuperación elástica del material para determinar la aptitud del mismo ante operaciones de conformado.

El ensayo consiste en la penetración de un punzón con un recorrido y fuerza determinada de forma controlada. La recuperación elástica del material se determina a partir de la distancia final e inicial de las ramas de la probeta y va a depender principalmente de la resistencia del material (propiedades del material como el límite elástico o el módulo de Young), del radio de doblado y del ángulo a conseguir. Estos parámetros están representados en la siguiente figura 2.19:

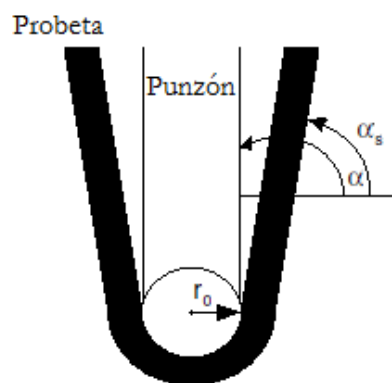


Figura 2.19.- Principio del ensayo de Springback

Dónde:

- $r_0$ : Radio de doblado
- $\alpha$ : Ángulo de partida
- $\alpha_s$ : Ángulo tras Springback

### 2.3.2. Procesos de estirado

#### a) Exponente de endurecimiento

El exponente de endurecimiento permite la evaluación de la conformabilidad del material en operaciones de estirado. Este factor se determina a partir de la ecuación de Hollomon.

La ecuación de Hollomon (ec 2.6) describe el comportamiento plástico de un acero mediante la relación de la tensión real y la deformación real de una probeta sometida a una tracción uniaxial, desde el límite elástico hasta la tensión máxima (resistencia a la tracción).

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (2.6)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_o \frac{l_0}{l}} = \frac{F}{(a_o \cdot b_o) \frac{l_0}{l}} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \quad (2.8)$$

Donde:

- $\sigma$ : Tensión real (N) (ec 2.6)
- $\varepsilon$ : Deformación real (ec 2.8)
- $n$ : Exponente de endurecimiento por deformación.
- $k$ : coeficiente de tensión característico
- $F$ : Carga ensayo tracción (N)
- $S$ : Sección correspondiente a la carga ( $\text{mm}^2$ )
- $S_o$ : Sección inicial ( $\text{mm}^2$ )
- $a_o$ : Espesor inicial (mm)
- $b_o$ : Ancho inicial (mm)
- $l$ : Longitud instantánea
- $l_0$ : Longitud inicial

El valor del **exponente de endurecimiento “n”** se determina a partir de la pendiente de la recta representativa de la zona plástica de la curva de tensión-deformación en escala logarítmica (ec 2.9 y 2.10). El rango de valores tomados para el cálculo del exponente “n” va a depender del tipo de acero, ya que cada familia se comporta de forma diferente ante una deformación (por ejemplo, en estado de recocido, los ferríticos tienen un alargamiento entorno al 30% y los austeníticos entorno al 60%).

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \rightarrow \log \sigma = \log k + n \log \varepsilon \quad (2.9)$$

$$n = \frac{d \ln \sigma_T}{d \ln \varepsilon_T} \quad (2.10)$$

Un valor elevado de n indica que el endurecimiento del material aumenta conforme se va produciendo la deformación.

#### b) Expansión de orificios

Se trata de un ensayo de estirado que evalúa la aparición de grietas generadas en los bordes troquelados en operaciones de fabricación anteriores. Para ello se lleva a cabo el ensayo de expansión de orificios circulares troquelados en la chapa mediante la acción de un punzón (figura 2.20). El ensanchamiento límite disminuye con el aumento de resistencia a la tracción de la chapa, y aumenta con el aumento del alargamiento total y del valor de anisotropía medio.

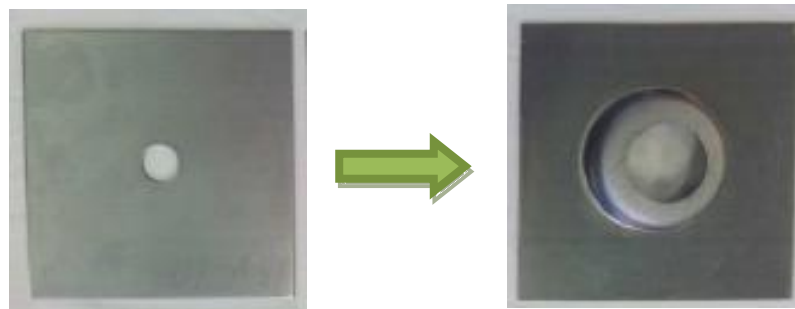


Figura 2.20.- Muestra de partida (izda) y tras el ensayo (dcha) de ensanchamiento de orificios

Este parámetro se calcula a partir de la ecuación 2.11.

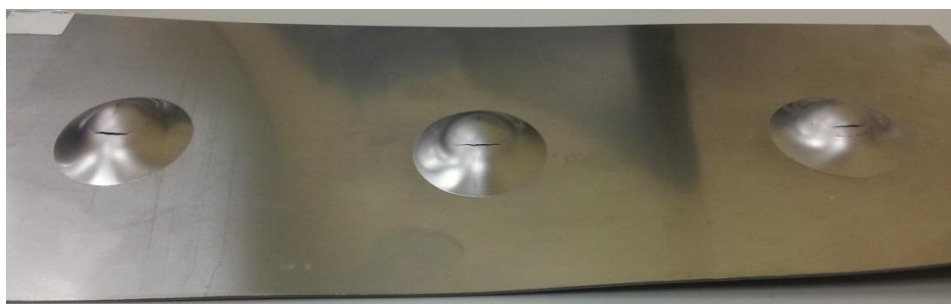
$$\lambda(\%) = \left( \frac{d - d_0}{d_0} \right) \cdot 100 \quad (2.11)$$

Donde:

- d: Diámetro final del agujero
- $d_0$ : Diámetro inicial del agujero

### c) Índice Erichsen

La determinación del índice Erichsen permite evaluar la aptitud de un material a la deformación plástica a partir de operaciones de estirado. Se realiza mediante el uso de una máquina de embutición y consiste en provocar una deformación en una probeta sujeta por un pisador. A continuación se aplica una presión sobre el material a partir de un punzón cuyo extremo es un casquete esférico, hasta el momento en el que se produce una grieta abierta (figura 2.21). El índice Erichsen se determina a través de la medida de la profundidad que el material se ha estirado mediante el desplazamiento del punzón.



*Figura 2.21.- Material tras la realización del ensayo de determinación del índice Erichsen*

### 2.3.3. Procesos de embutición

Uno de los conceptos fundamentales de la conformabilidad es la embutibilidad de un material. Un material tendrá una mayor embutibilidad cuanto mayor sea su capacidad de deformarse en el plano de la chapa frente a la deformación en el espesor de la misma.

#### a) Anisotropia

El grado de anisotropía plástica influye en el comportamiento de los materiales en operaciones de embutición o corte y va a depender de la orientación cristalográfica de los granos [31]

La variación del comportamiento plástico con la dirección es evaluada por el **coeficiente Lankford o coeficiente de anisotropía  $r$** , y se define a partir del cociente entre la deformación producida en el ancho y la variación real del espesor. Este coeficiente indica el valor de deformación que sufre un material expresado en tanto por ciento y se calcula a partir de los valores obtenidos por el extensómetro y contractómetro tras la aplicación del ensayo de tracción.

Es una medida de la capacidad del material para resistir el adelgazamiento. Un valor de  $r$  alta indica que el material posee unas buenas propiedades de embutición. El índice  $r$  se calcula a partir de la ecuación 2.12 por conservación de volumen (ec 2.13).

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{l \cdot w}{l_0 \cdot w_0}\right)} \quad (2.12)$$

$$V_0 = V \rightarrow t_0 \cdot w_0 \cdot l_0 = t \cdot w \cdot l \rightarrow \frac{t_0}{t} = \frac{w \cdot l}{w_0 \cdot l_0} \quad (2.13)$$

Dónde:

- $\epsilon_w$ : Deformación transversal (variación del ancho)
- $\epsilon_t$ : Deformación longitudinal (reducción del espesor)
- $w_0$  y  $w$ : Ancho inicial e instantáneo, respectivamente.
- $V_0$  y  $V$ : Volumen inicial e instantáneo, respectivamente.
- $l_0$  y  $l$ : Longitud inicial e instantáneo, respectivamente.
- $t_0$  y  $t$ : Espesor inicial e instantáneo, respectivamente.

Dado que el valor del índice  $r$  cambia con la dirección respecto a la dirección de laminación del material, para la evaluación de la aptitud de un material a operaciones de embutición, se determina el valor de la **anisotropía media** ( $r_m$ ) mediante la ecuación 2.14 y el valor de la **anisotropía planar** ( $\Delta r$ ) mediante la ecuación 2.15. La anisotropía media determina la profundidad media de la embutición más profunda posible y la anisotropía planar, proporciona información sobre la variación de  $r$  sobre el plano de la banda o chapa. Para el cálculo de estos dos parámetros, es necesario el cálculo de los índices  $r$  en probetas ensayadas en las tres direcciones ( $r_{0^\circ}$ ,  $r_{45^\circ}$  o  $r_{90^\circ}$ ).

$$r_m = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.14)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.15)$$

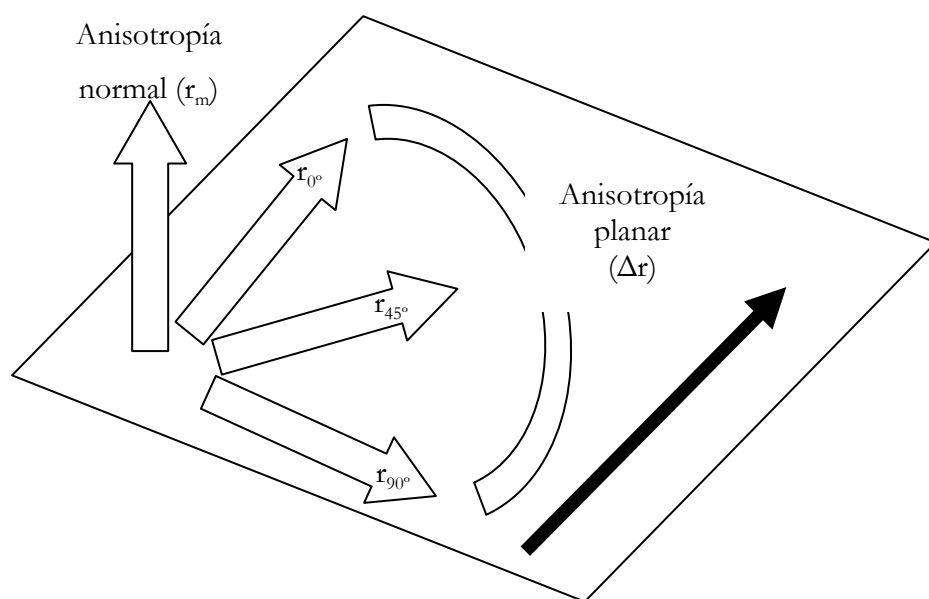


Figura 2.22.-Esquema de las diferentes direcciones principales para calcular  $r_m$  y  $\Delta r$  [30].

En la figura 2.22 se muestra de forma esquemática los parámetros de anisotropía media y planar.

Ya que la estructura metalográfica de un acero inoxidable depende del proceso de fabricación que ha seguido, valores mayores de 1 de  $r_m$  indica que el material tiene mejores propiedades de embutición al presentar una mayor deformación en el ancho que en el espesor, retrasándose la aparición de la estricción y de la rotura. Una buena combinación entre la anisotropía media y la planar proporcionará una embutibilidad óptima [45].

### b) LDR (*Limiting Draw Ratio*)

Consiste en determinar el diámetro máximo de un desarrollo circular que se puede estampar en forma de copa con un punzón de un diámetro prefijado (figura 2.23).

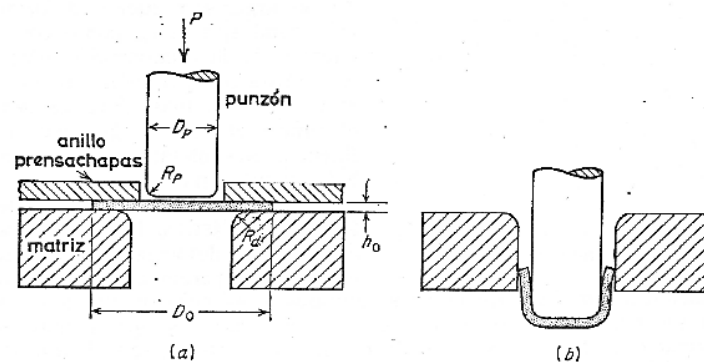


Figura 2.23.- Embutición profunda de una copa cilíndrica antes de la embutición (izda) y después de la embutición (dcha)

El parámetro LDR se determina mediante el cociente de diámetro máximo de la probeta que es embutida sin rotura entre el diámetro del punzón (ec 2.16). [10]

$$LDR = \frac{D_{max}}{d} \quad (ec\ 2.16)$$

### 2.3.4. Curva límite de conformabilidad

Los ensayos de límite de conformabilidad proporcionan información sobre la deformación plástica máxima a partir de la cual se producen los fenómenos de fallo (deformación localizada, pandeo, rotura, etc.) [42]

Los diagramas FLD muestran la combinación, en el plano principal, de la deformación mayor ( $\epsilon_2$ ) y menor ( $\epsilon_1$ ), a partir de las cuales ocurre el fallo. De esta forma se construye un mapa de deformación que muestra el inicio de la estricción localizada para los distintos caminos de deformación. En la figura 2.24 se muestra un diagrama FLD construido por Keeler y Goodwin [34] y [28]

]

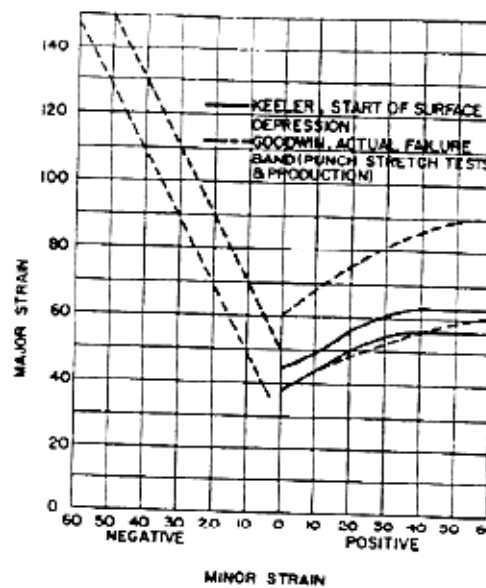


Figura 2.24.- Diagrama FLD completo (Keeler y Goodwin) [34] y [28]

Un diagrama FLD cubre estados de deformación desde la tensión uniaxial, a través de un estado de deformación plana [42], y la deformación biaxial. En este diagrama se traza la curva FLC (*Forming Limit Curve*), que define la máxima conformabilidad de un material en el diagrama FLD, y es utilizado ampliamente como criterio de fallo o de principio de la estricción.



La curva FLC define la zona del diagrama FLD bajo la cual las deformaciones no generan rotura en el material. Así, la combinación de deformaciones  $\epsilon_1$ - $\epsilon_2$  que quedan bajo la curva significa que el material no llega al límite de deformación, mientras que si esta combinación da un punto por encima de esta curva, probablemente se producirá la rotura del material. Existen diversos métodos para la determinación de esta curva.

### 2.3.5. Acabado superficial

La **rugosidad superficial** es el conjunto de irregularidades superficiales de paso relativamente pequeño, correspondiente a las huellas dejadas en la superficie real por el proceso de fabricación utilizado.

Este método consiste en el cálculo de los perfiles correspondientes a la medición de las distintas irregularidades de la superficie mediante la representación gráfica de la intersección de la superficie con un plano normal a la misma. Estos perfiles están formados por entrantes y salientes, cuya separación y altura dependen de dicho acabado (figura 2.25). El perfil de rugosidad se obtiene a partir de la aplicación de una serie de filtros que separan los distintos componentes. Las irregularidades de la superficie se identifican en una longitud de evaluación formada por cinco longitudes de muestreo.

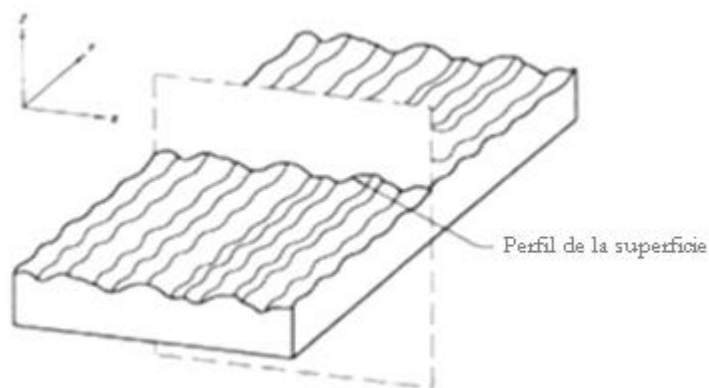


Figura 2.25.- Perfil de la superficie [19]

Los parámetros fundamentales para la evaluación de la rugosidad superficial son:

- **Ra:** Rugosidad media- Media aritmética de los cinco valores absolutos entre los picos y valles correspondiente a cada longitud de muestreo. Es el parámetro más representativo para la evaluación del estado superficial.
- **Rz:** Máxima altura del perfil- Suma de la máxima altura de pico y de la máxima profundidad de valle comprendida en una longitud de muestreo básica (toda la longitud de muestreo).
- **Rt:** Altura total del perfil- Suma de la mayor altura pico y de la mayor profundidad de valle comprendida en una longitud de evaluación. Se obtienen 5 valores de Rt por cada longitud de muestreo.

#### 2.4. Soldabilidad de los aceros inoxidables endurecidos

- **Definición de soldabilidad:** “Un acero se considera soldable por un procedimiento determinado y para una aplicación específica, cuando mediante una técnica adecuada se pueda conseguir la continuidad metálica de la unión, de tal manera que ésta cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de que forma parte integrante”. [40]

La soldadura es la unión de dos piezas metálicas, con o sin material de aporte, aplicando presión exclusivamente o calentando los materiales a una temperatura determinada, con o sin aplicación de presión [41].

La estructura metalúrgica resultante tras el proceso de soldadura, así como el comportamiento del conjunto soldado frente a la corrosión y punto de vista mecánico, están influenciados por la composición química del material base, del input térmico y las temperaturas a la que ha estado sometido. La elección del método

de soldeo más adecuado optimiza las condiciones de la estructura resultante de la unión soldada. Las condiciones más influyentes en la estructura son (figura 2.26):

- Área del cordón de soldadura.
- Velocidad de solidificación de la soldadura.
- Temperatura máxima o de pico en la Zona Afectada Térmicamente “*Heat Affected Zone*” (HAZ).
- Calor de aportación o input térmico (IT)
- Ancho de la HAZ.
- Velocidades de enfriamiento de la soldadura y de la HAZ.

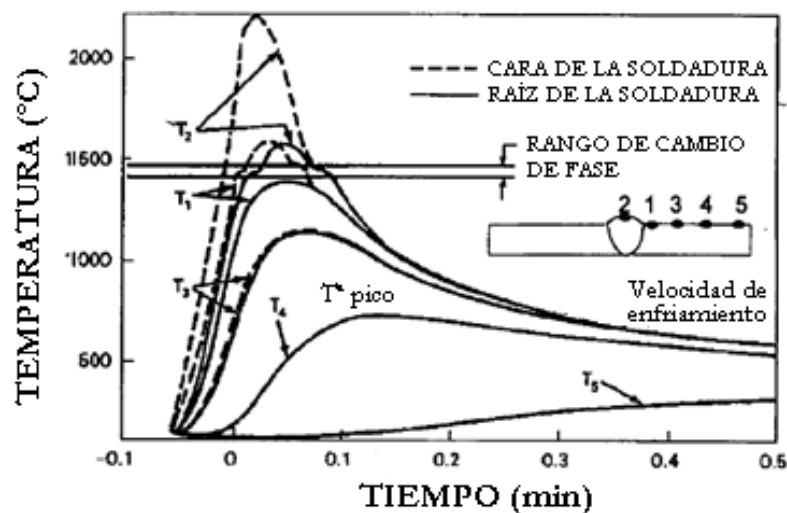


Figura 2.26.- Ciclo térmico de la soldadura. [62]

Los **conceptos básicos** de la unión soldada (figura 2.27) son:

- **Metal base:** Es el material a soldar, no afectado por la operación de soldadura, cuya composición química y estructura corresponden completamente a las de partida.
- **Metal de soldadura:** Es el metal fundido por la operación de soldeo y cuya composición química y estructura corresponden a las proporcionadas por la fusión del material de aportación y del metal base.

- **Zona afectada térmicamente o *Heat affected zone (HAZ)*:** Es la zona del metal base que ha permanecido durante cierto tiempo en una gama de temperaturas en la que pueden producirse transformaciones o modificaciones estructurales, ya sea por formación de otras fases en los aceros al carbono, por precipitación de compuestos de elementos intersticiales como carburos o nitruros o por formación de fases intermetálicas como fase sigma en los aceros inoxidable.

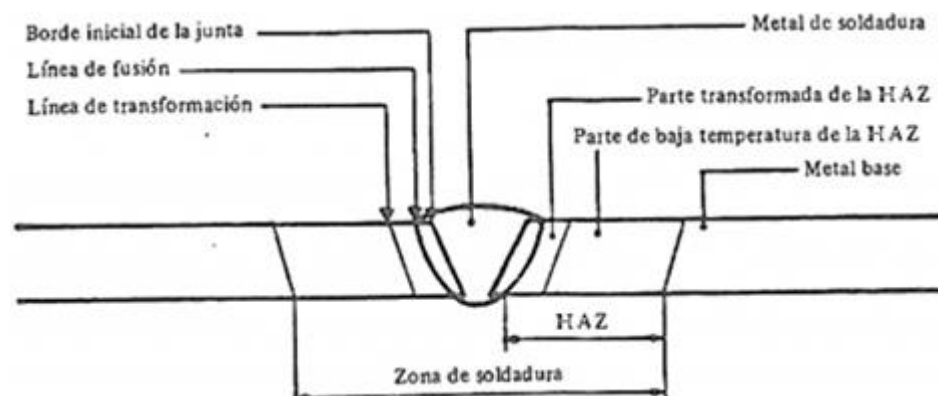


Figura 2.27.- Distintas zonas de la unión soldada [40]

Una ejecución no correcta del proceso de soldadura puede generar algunos efectos indeseables debido al calentamiento localizado y posterior proceso de enfriamiento de las piezas soldadas. [25]. Estos defectos se minimizan mediante la elección correcta del método más adecuado para cada situación y tipo de material, consumible, configuración de los parámetros básicos (input térmico, velocidad de soldeo, intensidad de corriente, etc.), limpieza exhaustiva del material y mediante tratamientos térmicos de post-soldadura.

La norma que regula la aplicación de la soldadura es la EN 15609- “Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure specification. Arc welding”. Para la evaluación de la calidad de la soldadura se emplea la norma EN 15614-1 “Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Ensayo del procedimiento de soldeo” [60].

### 2.4.1. Influencia de la estructura (D. Schaffler y DeLong)

Los elementos de aleación tienen una influencia sobre cada una de las fases cristalinas que van a determinar la estructura metalúrgica y por consiguiente, el tipo de acero inoxidable. Desde el punto de vista de la soldadura, el equilibrio entre las proporciones de los elementos de aleación del material base y del aportado debe ser adecuado para conseguir la estructura deseada.

Los elementos de aleación presentan una subdivisión básica:

- **Formadores de ferrita:** generadores de ferrita, también denominados alfégenos o ferritizantes y son: Fe, Cr, Si, Ti, Nb, Mo y Mn (formador de ferrita).
- **Formadores de austenita:** generadores de fase gamma, también denominados gammágenos o austenitizantes y son: C, Cu, Ni, N y Mn (estabilizador de la austenita).

Para predeterminar la estructura resultante tras la soldadura se pueden establecer los elementos de aleación adecuados y la fuerza relativa favor de la formación de cada una de las fases mediante la aplicación de unos diagramas [40]. Los más utilizados son los diagramas Schaffler (figura 2.28) y de DeLong (figura 2.29).

El diagrama de Schaffler establece la influencia de los elementos alfégenos y gammágenos en la formación de los distintos tipos de inoxidables. El diagrama ha sido trazado para indicar las estructuras que pueden aparecer en los cordones de soldadura. El diagrama de DeLong es una modificación al diagrama de Schaffler en el que además se tiene en cuenta el nitrógeno. [40]

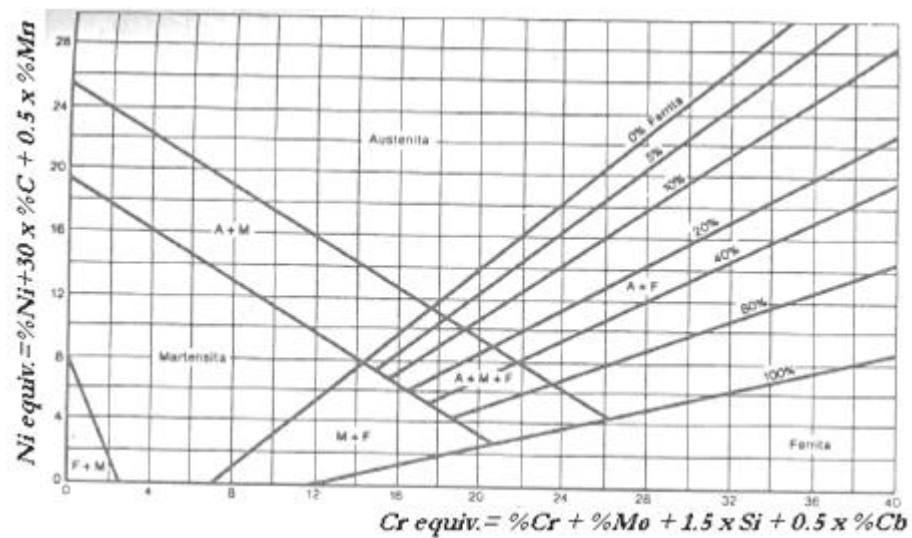


Figura 2.28.- Diagrama de Schaffler [40]

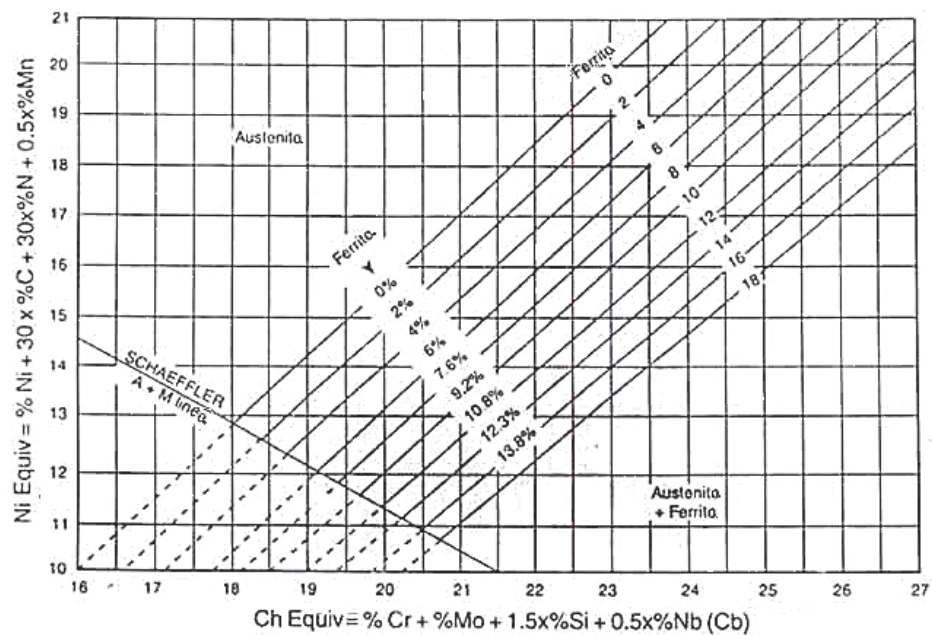


Figura 2.29.- Diagrama de DeLong [40]

Para la utilización de estos diagramas, se utilizan dos parámetros que dependen de la composición química de los materiales: equivalente en Ni (elemento básico formador de la austenita) y equivalente en Cr (elemento básico formador de ferrita). La estimación de estos parámetros se muestra a continuación:

- **Equivalente de níquel:** Se representa en ordenadas y es la suma de los porcentajes de elementos formadores de austenita, multiplicados por unos coeficientes. El cálculo de este parámetro se realiza mediante las ecuaciones 2.17 y 2.18.

$$Ni_{eq} \text{ Diagrama Schaffler} = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (2.17)$$

$$Ni_{eq} \text{ Diagrama de DeLong} = Ni + 30(C+N) + 0,5 \cdot Mn \quad (2.18)$$

- **Equivalente de cromo:** Se representa en abscisas como la suma de porcentajes de elementos formadores de ferrita multiplicados por coeficientes. El cálculo de este parámetro se realiza mediante la ecuación 2.19:

$$Cr_{eq} \text{ Diagrama Schaffler y DeLong} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Cb \quad (2.19)$$

#### 2.4.2. Energía de aportación o Input térmico

Se denomina energía de aportación o Input Térmico al calor que interviene en el proceso de soldeo. El input térmico es el factor dominante que gobierna los efectos térmicos en la soldadura, como la distribución de la temperatura pico o máxima, velocidad de enfriamiento y el tiempo de solidificación [62]. Además, existe una relación directa entre el input térmico y, el ancho del cordón y de la zona afectada térmicamente, ya que los dos últimos términos varían en función de la intensidad y la intensidad es directamente proporcional al input térmico.

De forma que, para valores de input bajos, desde el punto de vista de metalúrgico se observa un ancho de la HAZ menor mejorando de este modo las propiedades del metal soldado; y valores de input térmico altos, favorece la aplicación de soldaduras con pasadas largas permitiendo deposiciones y velocidades de producción altas, haciéndolo más competitivo desde el punto de vista económico.[1]

El input térmico va a variar en función del proceso de soldadura aplicado y su cálculo viene determinado a partir de la expresión 2.19:

$$IT = \left( \frac{V \cdot I \cdot 60}{S \cdot 1000} \right) \quad (2.19)$$

Donde:

- IT: Input térmico (kJ/mm)
- V: Voltaje (V)
- I: Intensidad (A)
- S: Velocidad de soldeo (mm/min)

#### 2.4.3. Zona afectada térmicamente (HAZ)

La zona afectada térmicamente o *Heat affected zone* (HAZ) es el área del material base (metal o termoplástico) cuya microestructura y propiedades se ven afectadas tras la aplicación de un proceso de soldadura.

El calor aportado por el proceso de soldadura y el posterior enfriamiento originan en el metal base unos cambios desde el interfaz de la soldadura hasta la temperatura de sensibilización. La extensión o magnitud de la HAZ depende básicamente del material base, del cordón de soldadura y de la concentración del input térmico tras el proceso de soldadura [1].

La acumulación del calor térmico aportado por el proceso de soldadura también afecta a la HAZ según el tipo de soldadura aplicada, donde procesos con oxifuel generan mayor input térmico y por consiguiente aumenta el tamaño de la HAZ. Sin embargo la soldadura por láser y por haz de electrones genera una alta concentración, limitando la cantidad de calor y generando una HAZ pequeña. La soldadura mediante arco está en medio de los dos procesos antes mencionados.



Uno de los factores cualitativos de la HAZ es el ancho, el cual está influenciado por las propiedades físicas del material,  $T^a$  de fusión,  $T^a$  inicial,  $T^a$  pico y energía de aportación o input térmico.

El **ancho del HAZ** se puede determinar a partir de la siguiente ecuación (ec 2.20):

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4,13 \cdot \rho \cdot c \cdot e \cdot Y}{IT} + \frac{1}{T_f - T_0} \quad (2.20)$$

Donde:

- $T_p$ : Temperatura pico ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_0$ : Temperatura inicial ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_f$ : Temperatura fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\rho$ : Densidad ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )
- $c$ : calor específico ( $\text{J}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
- $e$ : Espesor (mm)
- $IT$ : Input térmico
- $Y$ : Distancia del punto a la línea de soldadura (mm)

La **temperatura pico** es la temperatura máxima que alcanza el material durante la aplicación del ciclo térmico de soldadura. A mayor temperatura pico más afectación de la microestructura de la HAZ.

#### 2.4.4. Velocidad de enfriamiento

La velocidad de enfriamiento es otro de los principales factores que afecta de forma significativa a la metalurgia y propiedades de la estructura. La velocidad de enfriamiento se determina en la línea central de la soldadura en el momento que el material está pasando por la temperatura de interés  $T_c$ . Va a depender del espesor del material (fino o grueso) y del número de pasadas requeridas. Varía en función de la posición y del tiempo [1]

La ecuación (Ec. 2.10) para determinar la velocidad de soldadura en el centro del cordón de la soldadura para espesores finos es la siguiente:

$$R = \frac{2\pi k(T_c - T_o)^2}{IT} \quad (2.21)$$

Donde:

- R: Velocidad de enfriamiento (°C/s)
- k: conductividad térmica (J/mm · s · °C)
- IT: Input térmico (J/mm)
- $T_c$ : Temperatura de interés (°C)
- $T_o$ : Temperatura inicial (°C)

La determinación de la velocidad de enfriamiento sirve para calcular los requisitos de precalentamiento. [1]

#### 2.4.5. Métodos de soldeo

En general todos los tipos de acero inoxidable son soldables mediante todos los procesos de soldadura. La selección del proceso va a depender del tipo de material a soldar (asutenítico, ferrítico, dúplex, etc.), del espesor y dimensiones del material, de la aplicación del producto final y acabado (en aquellas zonas donde prevalezca la apariencia, como es el caso de aplicaciones estructurales) y de la disponibilidad del equipo. [1]

Los de métodos de unión van a diferenciarse según la fuente de energía de calor, de la temperatura de fusión del proceso, del material de aporte utilizado, del tipo de atmósfera, del material y del espesor de la pieza a soldar.

Los **principales métodos de soldadura** aplicables a los aceros inoxidable son:

- Soldaduras Blandas y Fuertes
- Procesos por arco eléctrico
  - o Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) o Tungsten Inert Gas (TIG)
  - o Plasma Arc Welding (PAW) - Plasma
  - o Gas metal Arc Welding (GMAW) o Metal Inert Gas (MIG)
  - o Submerged Arc Welding (SAW) - Arco sumergido
- Procesos por resistencia y por inducción
  - o Resistance Spot Welding (RSW) o Resistance Seam Welding (RSEW)
    - Por puntos y por roldana
  - o High Frequency Induction Welding (HFIW) - Por inducción de alta frecuencia
- Por energía de radiación
  - o Electron Beam Welding (EBW) - Haz de electrones
  - o Laser Beam Welding (LBW) - Láser

En general, los **procedimientos de soldadura** deben contener los siguientes puntos:

- Verificación del método de soldadura detallando lo que se obtiene de dicho método y ensayos del procedimiento de soldadura.
- Cualificación de los soldadores.
- El control de las operaciones de soldadura durante la preparación, la soldadura en sí y el tratamiento posterior.
- El nivel de inspección y las técnicas de ensayos no destructivos a aplicar.
- Los criterios de aceptación para el nivel permitido de defectos de soldadura [22].

A continuación se describen de forma detallada algunos de estos métodos.

#### **2.4.5.1. Soldadura blanda y fuerte**

##### **a) Soldadura Blanda (Soldering)**

Consiste en la unión de dos piezas de metal mediante la aplicación de otro metal en estado líquido llamado “material de aporte”. La unión se consigue mediante una aleación entre ambos metales de forma que quedan adheridos entre sí. Este proceso se realiza a una temperatura de fusión no superior a los 430°C. Los materiales de aporte más utilizados en este tipo de soldadura son el plomo y el estaño, con una temperatura de fusión de 180 y 370°C respectivamente. [41]

##### **b) Soldaduras fuertes (Brazing)**

Se trata de un proceso de unión entre dos metales con un punto de fusión superior a los 430°C mediante la aplicación de un material de aporte en estado líquido con una temperatura menor a la del punto de fusión. Los materiales de aporte más comunes son aleaciones de cobre, aluminio o plata. Este tipo de soldadura se puede clasificar por la forma de aplicar el metal de aporte. [41]

#### **2.4.5.2. Soldadura por arco eléctrico**

La energía aplicada en este proceso se consigue por medio del calor producido por un arco eléctrico formado en el espacio comprendido entre la pieza a soldar y un electrodo, pudiendo alcanzar temperaturas superiores a 5500°C. El electrodo actúa como material de aporte fundiéndose al paso por las piezas a unir. El arco se enciende cortocircuitando el electrodo con la pieza a soldar, en cuyo punto de contacto se produce un calentamiento óhmico tan intenso que hace que se empiece a fundir el extremo del electrodo. [41]

### a) Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)/Tungsten Inert Gas (TIG)

El proceso GTAW también conocido como TIG (Tungsten Inert Gas) o WIG (Wolfram Inert Gas) se muestra en la figura 2.30:

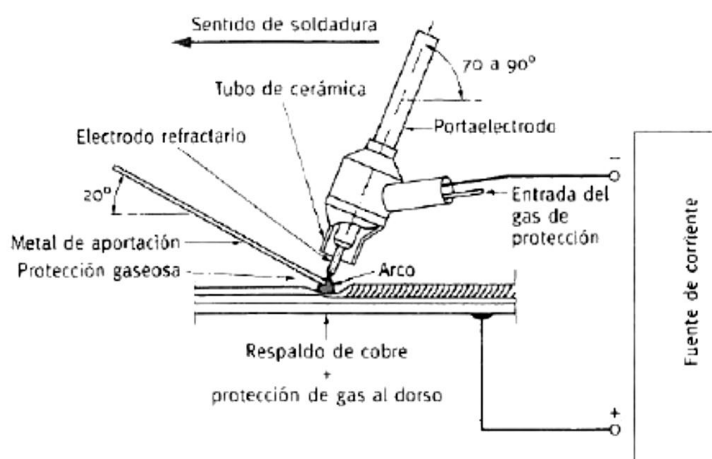


Figura 2.30.- Esquema proceso GTAW/TIG [14]

La fuente de energía necesaria para la fusión en este tipo de soldadura se suministra mediante la generación del arco eléctrico entre un electrodo de wolframio con 2%  $\text{ThO}_2$  y la pieza bajo una atmósfera reductora inerte evitando el contacto con el aire. [14]. El electrodo está refrigerado por agua y su diámetro es función de la corriente de la soldadura. [18] En los aceros inoxidables la alimentación eléctrica es siempre en corriente continua con polaridad directa para prolongar la duración del electrodo (negativo del generador al electrodo  $\rightarrow$  electrones dirigidos a la pieza de trabajo). Este tipo de soldadura puede emplearse de forma manual o en automático y puede incorporar o no material de aporte. [14] El material de aporte está constituido por una varilla de acero inoxidable escogida en función del metal base [18].

**Ventajas:** Fuente de calor concentrada que conduce una zona estrecha de fusión. No se dan salpicaduras ni residuos de oxidación. Tiene una excelente calidad metalúrgica ya que tanto la penetración como la posición de la soldadura se realizan de forma controlada. Estabilidad del arco. Ausencia de poros y poco desgaste de los electrodos. Amplio campo de aplicación [14].

**Características de la pieza:** El rango de espesor de las piezas que se pueden soldar con este método es desde espesores muy finos (0,4-0,5 mm) hasta espesores de 5-6mm. [18].

### b) Plasma Arc Welding (PAW) – Plasma

Este tipo de soldadura ocurre cuando un gas es calentado a una temperatura suficiente para conseguir su ionización, separando así el elemento en iones y electrones. [18] Gracias a que dispone de una fuente de calor muy concentrada y direccional capaz de alcanzar temperaturas muy elevadas del orden de 10.000 y 20.000 °C, se consigue una disminución de la zona de impacto, dos o tres veces menos que el sistema TIG. Se utilizan gases inertes como argón puro, argón-hidrógeno superior al 20%, argón-helio-hidrógeno.

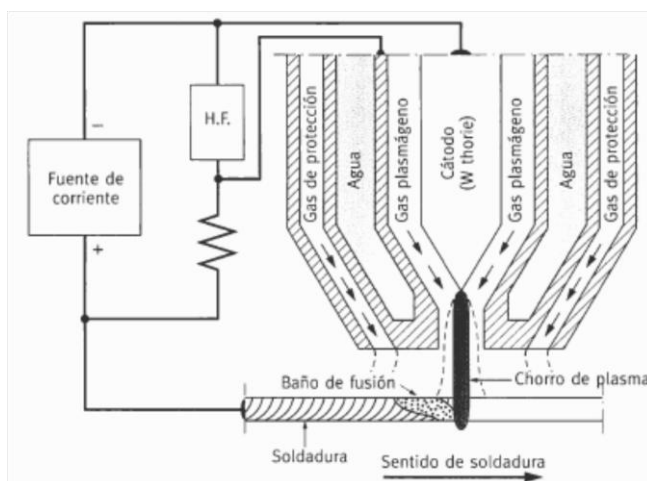


Figura 2.31.- Esquema proceso PAW [14]

El soplete está compuesto por un electrodo de aleación de tungsteno, el cuerpo refrigerado mediante circulación de agua, y una punta con una boquilla por donde sale el plasma. Alrededor de esta boquilla se encuentra una ranura de salida del gas de protección (figura 2.31).

**Ventajas:** Alta velocidad y HAZ estrecha. Proceso muy adecuado para la fabricación de tubos soldados. [18] Estabilidad del arco gracias al control del input térmico.

tolerancia a las variaciones de la distancia de la punta del soplete sin variar la morfología de la soldadura.

**Características de la pieza:** Este sistema es idóneo en espesores de 2,5-10mm, en cuyo caso se opera con una sola pasada y sin preparación de bordes. Para espesores inferiores a 2,5mm el sistema TIG es más ventajoso y para espesores superiores a 10mm es más beneficioso el sistema MIG o Arco Sumergido (SAW) [18]

### c) Gas metal Arc Welding (GMAW)/ Metal Inert Gas (MIG)

Se compone por un electrodo consumible enrollado en bobina que se funde por arco eléctrico generado entre él y el metal base. El gas inerte protege la zona de fusión y puede estar compuesto por Ar+2% de O (adecuado para la mayoría de los casos), por Ar +3% CO<sub>2</sub>, por Ar+He+H+O o Ar+He+H+O+CO<sub>2</sub> (ambos compuestos utilizados para incrementar la velocidad de soldeo y la penetración). [18]

El hilo tiene un diámetro de 0,5-2,5mm dependiendo del espesor a soldar y circula por un soplete refrigerado por agua. El hilo avanza mediante la acción de la corriente eléctrica continua con polaridad inversa (positivo en el electrodo y negativo en la pieza) a una velocidad manualmente regulada (figura 2.32). Suele realizarse en una sola pasada. [18]

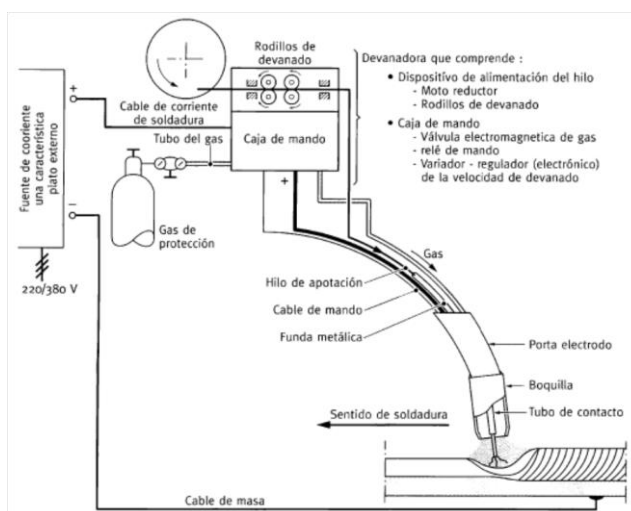


Figura 2.32.- Esquema proceso GMAW/MIG [14]

**Ventajas:** Tienen una alta velocidad de avance lo que disminuye la HAZ, disminuye la tendencia de aumento del tamaño de grano y de las deformaciones, consiguiendo una alta productividad. Buena apariencia o acabado (pocos salpicados), disminución de defectos del cordón y buena calidad radiográfica. Se puede soldar en todas las posiciones. Poca formación de gases contaminantes y tóxicos y ausencia de escoria para retirar. [1]

**Características de la pieza:** Para soldaduras “short-arc” permite espesores entre 0,8-4mm, sin preparación de bordes (bordes rectos) hasta los 3 mm y con un pequeño chaflán para espesores superiores. Para soldaduras “spray-arc” sólo se utiliza en horizontal para espesores comprendidos entre 3,5-5mm sin influir en la estética del cordón. Para espesores superiores a 5mm necesitan una preparación de bordes en V [18]

#### 2.4.5.3. Soldadura por resistencia y por inducción

El principio del funcionamiento del proceso de resistencia consiste en hacer pasar una corriente eléctrica de gran intensidad a través de los metales que se van a unir. La alimentación eléctrica pasa por un transformador en el que se reduce la tensión y se eleva considerablemente la intensidad para aumentar la temperatura. La soldadura por resistencia es aplicable a casi todos los metales, excepto el estaño, zinc y plomo. [41]

#### 2.4.5.4. Soldadura por energía de radiación

La unión de fusión por radiación infrarroja (IR) consiste en calentar a temperatura de fusión las áreas de los componentes (tuberías, accesorios, válvulas) uniéndose mediante presión mecánica sin usar materiales suplementarios. Se utiliza para aplicaciones industriales. Se caracteriza por tener velocidades elevadas, bajo riesgo de contaminación y fusión de baja tensión. [41].



#### 2.4.6. Efectos indeseables de la soldadura

En general los aceros inoxidable presentan una buena soldabilidad siempre que se empleen los sistemas de soldadura adecuados en cada caso, aunque la aplicación indebida de los mismos puede generar algunos defectos de distinta índole. Los principales son debido a los elevados esfuerzos de contracción de la estructura austenítica que pueden favorecer la aparición de grietas y por la formación de precipitados, dada la existencia de los distintos elementos de aleación, relacionados con la estructura metalográfica de la unión soldada. Estos efectos pueden ocasionarse por errores en la elección de los parámetros, del material y del diseño de la unión soldada.

Algunos efectos, desde el *punto de vista mecánico*, son la generación de tensiones térmicas debido a las dilataciones del material durante el ciclo térmico cuando la temperatura no sea uniforme.

También puede existir tensiones residuales que afectan al comportamiento de estructuras soldadas de forma significativa en fenómenos que tienen lugar a tensiones bajas, como puede ser fatiga, fractura frágil y corrosión bajo tensión. La deformación plástica se produce cuando estas tensiones alcanzan el límite de fluencia en el cordón de soldadura.

Por otro lado, la *estructura* puede verse afectada por:

- **Aumento del tamaño de grano:** Puede provocar en el material una disminución de las propiedades mecánicas (como la resiliencia) tanto en aceros inoxidable austeníticos como ferríticos. Si además existen tensiones internas debido a la dilatación del material, puede iniciarse una recristalización y formación de nuevos granos con una disposición diferente [18]
- **Precipitación de carburos de cromo:** Aparece sobre todo en los aceros inoxidable austeníticos dado su alto contenido en cromo. Se trata de un fenómeno de sensibilización y suele darse en intervalos de temperatura de

450-850°C donde llega a producirse corrosión intergranular para intervalos cortos de tiempo. Para los aceros ferríticos estabilizados, el enfriamiento puede ser problemático [18]

- **Formación de fase sigma:** Puede darse en aceros ferríticos y en aceros austeníticos con alto contenido en cromo. Esta fase origina una disminución de la tenacidad, de la resistencia a la corrosión y de la resistencia a la fluencia. En función del tipo de acero, el rango de temperatura de formación de esta fase es variable [18]
- **Transformaciones martensíticas:** Son típicas en los aceros martensíticos sobre todo en la zona afectada térmicamente, donde dependiendo del contenido de carbono, puede disminuir la tenacidad y formarse grietas. [18]

Algunos de estos defectos pueden controlarse parcialmente por ***dos medios***:

- 1) Modificando el ciclo térmico de la soldadura actuando sobre las variables del proceso de soldadura, como el input térmico (aunque tienen algunas limitaciones) y por medio del precalentamiento del material base.
- 2) Realizando un ciclo térmico posterior con temperaturas y velocidades de calentamiento/enfriamiento controlado. A este ciclo se le llama “*tratamiento térmico post soldadura*”. Normalmente, actúa en conjunto con el precalentamiento [25].

#### 2.4.7. Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos

Dada la variedad del comportamiento de las distintas fases, cada familia de acero inoxidable precisa de unos requisitos para la realización de una soldadura óptima. Por ello, cada acero inoxidable requerirá de un material de aporte y unas condiciones determinadas [1]. Ya que los aceros evaluados en este TFC pertenecen a la familia de

aceros inoxidables austeníticos, a continuación se exponen las condiciones básicas de soldadura para esta familia.

- **Propiedades físicas**

Dentro de las propiedades físicas, los aceros austeníticos tienen un coeficiente de dilatación alto y una conductividad baja, lo que provoca una HAZ estrecha.

- **Elección del material de aporte y del proceso de soldeo**

En la figura 2.33 se recoge la correcta elección de los materiales de aporte:

Metal base AISI	Materiales de aportación recomendados						FN	Observaciones
	AWS E/ER	C	Cr	Ni	Mo	Otros	% Ferrita MIG/TIG	
MATERIALES DE APORTACION PARA SOLDADURAS HOMOGENEAS								
301	308	0,05	20	9,5	—	—	FN9	— —
304	308	0,05	20	9,5	—	—	FN9	— —
304H	308	0,05	20	9,5	—	—	FN9	Alta temperatura
304H	347	0,04	19,5	9,5	—	Nb12 x C	FN8	Alta temperatura
304L	308L	<0,025	20	10	—	—	FN9	— —
304L	308LSi	<0,025	20	10,5	—	Si 0,8	FN12	Soldadura MIG
316	316	0,05	19,5	11,5	2,2	—	FN9	— —
316H	316	0,05	19,5	11,5	2,2	—	FN9	Alta temperatura
316L	316L	<0,025	19	11,5	2,2	—	FN9	— —
316L	316LSi	<0,025	18,5	12	2,6	Si 0,8	FN9	Soldadura MIG
321/347	308L	<0,025	20	10	—	—	FN9	Baja temperatura
321/347	308LSi	<0,025	20	10,5	—	Si 0,8	FN12	Baja temperatura/MIG
321/347	347	0,04	19,5	9,5	—	Nb12 x C	FN8	Alta temperatura
321/347	347Si	0,04	19,5	10	—	Nb12 x C	FN9	Alta temperatura/MIG
316Ti	316L	<0,025	19	11,5	2,2	—	FN9	— —
316Ti	316LSi	<0,025	18,5	12	2,6	Si 0,8	FN9	Baja temperatura/MIG
316Ti	318	0,04	18,5	11,5	2,6	—	FN10	Alta temperatura
316Ti	318Si	0,04	18,5	12,5	2,6	Si 0,8	FN10	Alta temperatura/MIG
310	310	0,12	26	21	—	—	0%	Alta temperatura
310S	310	0,12	26	21	—	—	0%	Alta temperatura
430	430	<0,08	17	—	—	Ti 0,6	100%	— —
MATERIALES DE APORTACION PARA SOLDADURAS HETEREGONEAS								
	309	0,06	23,5	13	—	—	FN9	— —
	309Si	0,08	23,5	13,5	—	Si 0,8	FN9	— —
	309L	<0,020	23,5	13,5	—	—	FN19	— —
	312	0,09	30	9	—	—	70%	— —
	NiCr3	<0,03	20	72,5	—	Ti 0,4 Nb 2,5	0%	— —

Figura 2.33.- Materiales de aporte [40]

La elección del proceso de soldeo depende de los siguientes factores:

- Bajo Input térmico
- Distribución equilibrada del calor mediante varias etapas de forma simétrica.
- Operatividad
- Velocidad de soldeo
- Inconvenientes desde el punto de vista de resistencia a la corrosión.
- Disponibilidad comercial y coste.

- **Agrietamiento en caliente del metal austenítico aportado**

En los casos en los que no se aplican las condiciones óptimas de soldadura pueden llegar a generarse grietas debido a unas tensiones de contracción que resultan de la acumulación de impurezas. Para evitar este efecto se puede reducir las tensiones mecánicas, eliminar las impurezas y disminuir las segregaciones.

- **Precalentamiento y tratamiento térmico del conjunto soldado**

En la mayoría de los casos para estos aceros no es necesario aplicar ningún tratamiento térmico de post-soldadura, sobre todo para aplicaciones estructurales donde la realización de la soldadura es in situ. La elección del tratamiento térmico será para reducir las tensiones acumuladas del material durante la soldadura mediante la aplicación de un calentamiento comprendido entre 1000-1100°C seguido de un enfriamiento rápido.

- **Consideraciones metalúrgicas**

Los factores metalúrgicos más significativos para los aceros austeníticos tras el proceso de soldadura son los siguientes:

- *Contenido de ferrita:* En este tipo de aceros, un cierto contenido en ferrita puede ser favorable de modo que previene la aparición de grietas, ya que la ferrita hace que aumente la ductilidad, las características mecánicas (tenacidad), la resistencia a la corrosión intergranular. Por otro lado, la presencia de esta misma disminuye la resistencia a la corrosión frente a ácidos oxidantes calientes y permite la formación de la fase sigma. El contenido idóneo es entre el 5-10% y se consigue con la adecuada elección del material de aportación y las condiciones de operación óptimas.

- *Formación de precipitados en los grados austeníticos:* Un exceso de aporte de calor puede provocar en estos aceros, un crecimiento de grano y la precipitación de fases frágiles e intermetálicas. [22].
- *Fisuración por solidificación en categorías austeníticas:* No emplear el adecuado consumible y favorecer la aparición de un exceso de ferrita puede generarse grietas. Este efecto se evita reduciendo el metal de aportación y aplicando las condiciones de soldadura más adecuadas [23].

## **CAPÍTULO 3**

---

### **OBJETIVOS Y ALCANCE**

### CAPITULO 3. OBJETIVOS Y ALCANCE

En base a la justificación y a los antecedentes establecidos en los capítulos anteriores, el objetivo general de este TFC consiste en la mejora del conocimiento de los inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío e intentar resolver algunas cuestiones que limitan su uso. Dentro de este objetivo genérico se encuentran varios objetivos individuales expuestos en detalle a continuación.

El primer objetivo parcial de este TFC consiste en realizar una **revisión detallada de la normativa existente**, dada la escasa y a veces poca clara información relacionada con los requisitos y especificaciones de los aceros inoxidables endurecidos por deformación en frío para su uso en aplicaciones estructurales.

Un segundo objetivo se basa en la realización de una **estadística de las propiedades mecánicas** procedentes de los resultados de certificación de los materiales endurecidos por deformación en frío fabricados en las instalaciones de Acerinox Europa S.A.U. en los últimos 8 años, para intentar establecer una relación entre la resistencia mecánica y el límite elástico, ya que la normativa en muchos casos requerirá un control de ambos parámetros.

Un tercer objetivo es estudiar en profundidad la microestructura, las propiedades mecánicas y de conformabilidad; y la soldabilidad de estos aceros, así como las relaciones existentes entre estos aspectos. Para ello se ha seleccionado una serie de muestras correspondientes a tres tipos de aceros inoxidables austeníticos (dos variantes del EN 1.4301 y una del EN 1.4310), tres grados de endurecimiento ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$ ) y distintos espesores desde 0,6 mm a 2,7 mm, en función de la producción y disponibilidad de estos materiales. Para el cumplimiento de este tercer objetivo se va llevar a cabo el plan de trabajo que se describe a continuación:

- **Programa de caracterización de materiales** que incluye: composición química, microestructura, tamaño de grano y propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento y dureza).
- **Estudio del comportamiento de los materiales endurecidos por deformación en frío en operaciones de conformado** mediante doblado, estirado (exponente “n”, índice Erichsen), embutición (anisotropías normal y planar), recuperación elástica (Springback) y posible influencia del acabado superficial.
- **Estudio de la soldabilidad** de estos materiales que consta de dos líneas de investigación principales. Una primera en la que se establecen las condiciones óptimas de soldeo mediante un ensayo de simulación de la zona afectada térmicamente; y una segunda línea en la que se realizan soldaduras TIG sin aporte partiendo de los resultados anteriores, comprobando las características resultantes de dicha soldadura (aspecto visual, microestructura, tamaño de grano y propiedades mecánicas).

Para **concluir**, a partir de los resultados que se obtengan de cada uno de los ensayos planteados, se estimará la relación existente entre las principales variables del proceso de producción de estos aceros (etapas de laminación intermedia y final de los distintos espesores y grados de endurecimiento) y la microestructura (tamaño de grano, generación de martensita y grado de magnetismo), propiedades finales de suministro ( $R_m$ ,  $R_{p0,2\%}$ ,  $A$  y dureza); y comportamiento del material en operaciones de conformado y de soldadura.



# **CAPÍTULO 4**

---

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

## **CAPÍTULO 4.- MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se describen los materiales estudiados y los principales equipos y métodos que se han empleado para el desarrollo de este trabajo fin de carrera.

### **4.1. Materiales**

Tal como se ha descrito en el Capítulo 2, existe una amplia gama de tipos de aceros inoxidable y la elección de un tipo u otro va a depender de la aplicación para la que se emplee.

En este TFC se ha tenido en cuenta el uso de los aceros inoxidable para aplicaciones estructurales. Uno de los tipos de aceros más utilizados para esta aplicación son los aceros austeníticos, en concreto, el grupo de aceros “endurecidos por deformación en frío”, los cuales se caracterizan por sus altas prestaciones de servicio adquiridas por la deformación.

Para cumplir con los objetivos de este TFC, se han seleccionado materiales correspondientes a tres tipos de aceros inoxidable austeníticos endurecidos por deformación en frío con distintos espesores y grado de endurecimiento de suministro, para evaluar la influencia de los distintos grados de reducción en su comportamiento mecánico y en el proceso de fabricación de soldadura.

La obtención de todas las muestras se ha realizado a partir de bobinas de diferentes coladas fabricadas durante el año 2012 en Acerinox Europa S.A.U. La mayoría de las muestras pertenecen a la zona central de la bobina, ya que es la zona más representativa del material en cuanto a sus propiedades finales.

#### 4.1.1. Estadística propiedades mecánicas

Para el cumplimiento del segundo objetivo se establece una estadística de las propiedades mecánicas básicas ( $R_m$ ,  $R_{p0,2\%}$ ,  $A$  y  $HV$ ) sobre una población de 897 muestras, a partir de la base de datos de ensayo de la empresa Acerinox Europa S.A.U., en la que se registran los resultados de los aceros endurecidos por deformación en frío de los 3 grados de endurecimiento que se fabrican en esta empresa ( $1/4$ ,  $1/2$  y  $3/4$ ) en un rango de espesores ensayados desde 2005.

#### 4.1.2. Selección aceros endurecidos por deformación en frío

En este TFC se han acopiado materiales pertenecientes a tres **tipos de aceros** inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío:

- Dos versiones del tipo AISI 304 o EN 1.4301, la primera contiene una composición química genérica cuya identificación en este TFC es 1.4301 (v1) y una segunda versión con una pequeña modificación en el contenido de carbono (inferior respecto a la primera versión) cuya denominación es 1.4301 (v2).
- Un AISI 301 o EN 1.4310 con menos contenido en níquel respecto al AISI 304 o EN 1.4301

La tabla 4.1 muestra los valores medios de composición química de los 3 aceros considerados en este TFC.

TIPO DE ACERO	C	Cr	Cu	Mn	Mo	N	Ni	P	Si	S
1.4301 (v1)	0,046	17,68	0,32	1,69	0,28	0,052	8,07	0,033	0,35	0,004
1.4301 (v2)	0,032	17,66	0,46	1,32	0,27	0,058	8,25	0,033	0,35	0,002
1.4310	0,045	18,10	0,59	1,86	0,18	0,079	6,90	0,035	0,39	0,002

Tabla 4.1.- Composición química media de los tres aceros acopiados

Por otro lado, para la evaluación del **grado de endurecimiento** se han acopiado materiales con tres grados de endurecimiento:  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$ , en un rango de **espesores** entre 0,6 – 2,7 mm, en función de la disponibilidad de los mismos en la empresa. La combinación de estos tres parámetros (tipo de acero, grado de endurecimiento y espesor) se muestra en la tabla 4.2.

	ACERO (EN)	GRADO DE ENDURECIMIENTO	ESPESOR (mm)
1	1.4301 (v1)	$\frac{1}{4}$	1,5
2			1,7
3			2
4			2,3
5	1.4301 (v2)		1,5
6			2
7			2,3
8			2,7
9	1.4310		2,6
10	1.4301 (v1)	$\frac{1}{2}$	0,6
11			0,7
12			2,4
13		$\frac{3}{4}$	0,75

Tabla 4.2.- Aceros endurecidos por deformación en frío acopiados.

En las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 se muestra la identificación de cada una de las muestras seleccionadas para la realización del programa de ensayo de valoración de la microestructura, propiedades mecánicas, conformabilidad y soldabilidad. Además, a partir de estos mismos, se establecen las relaciones entre las condiciones de proceso, la microestructura generada y las propiedades resultantes.

Debido a la disponibilidad de los materiales de acuerdo con la producción de esta fábrica, existe variación en el número de muestras acopiadas para cada caso, variando de dos a nueve muestras por tipo.

ACERO	GRADO ENDUREC.	ID	ESPESOR (mm)
1.4301 (v1)	$\frac{1}{4}$	1A	1,540
		1B	1,505
		1C	1,504
		1D	1,520
		1E	1,48
		2A	1,757
		2B	1,733
		2C	1,680
		2D	1,715
		2E	1,706
		2F	1,721
		2G	1,735
		2H	1,734
		2I	1,724
		3A	2,035
		3B	1,995
		3C	2,001
		3D	2,030
		3E	2,030
		3F	2,044
		3G	2,004
		3H	2,003
		3I	2,000
		3J	2,004
		4A	2,310
		4B	2,33
		4C	2,33
	$\frac{1}{2}$	10A	0,604
		10B	0,601
		11A	0,709
		11B	0,676
		12A	2,409
		12B	2,408
	$\frac{3}{4}$	13A	0,797
		13B	0,772

Tabla 4.3.- Identificación de las muestras acopiadas de EN 1.4301 (v1)

ACERO	GRADO ENDUREC.	ID	ESPESOR (mm)
1.4301 (v2)	$\frac{1}{4}$	5	1,441
		6	1,992
		7	2,273
		8	2,693

*Tabla 4.4.- Identificación de las muestras acopiadas de EN 1.4301 (v2)*

ACERO	GRADO ENDUREC.	ID	ESPESOR (mm)
1.4301	$\frac{1}{4}$	9A	2,580
		9B	2,577
		9C	2,615

*Tabla 4.5.- Identificación de las muestras acopiadas de EN 1.4310*

Para llevar a cabo la batería de ensayos prevista en este TFC, se procedió con la petición de corte de muestras de 500mm x ancho de banda (1000 o 1250 mm) al laboratorio. Una vez allí, se cortaron todas las probetas pertinentes según las dimensiones establecidas por cada una de las normas de ensayos realizados sobre las mismas.

Las dimensiones de las probetas de cada uno de los ensayos vienen establecidas en la descripción del ensayo pertinente en el punto 4.2 de este capítulo.

#### 4.1.3. Selección de materiales para ensayo HAZ

Para la realización del programa de simulación HAZ se han seleccionado, a partir de los materiales de la tabla 4.4, 4.5 y 4.6, 10 materiales agrupados en 5 grupos distintos, en los que se combinan los siguientes tres parámetros: tipo de acero, grado de endurecimiento y espesor. De esta forma, se estudia la influencia del input térmico en

la zona afectada térmicamente en todo el rango de estos tres parámetros. Estos grupos están formados por los siguientes materiales:

- GRUPO A: Representa los espesores más finos de un mismo tipo de acero con dos grados de endurecimiento diferente.
- GRUPO B: Igual que el Grupo A, solo que en este caso se trata de espesores gruesos del mismo tipo de acero con dos deformaciones distintas.
- GRUPO C: Para un mismo espesor y grado de endurecimiento, se consideran dos tipos de acero para ver la influencia de la composición química.
- GRUPO D: Igual que el Grupo C, dos tipos de acero distinto con el mismo espesor, en este caso superior al del Grupo C y mismo grado de deformación.
- GRUPO E: Igual que los Grupos C y D, mismo grado de endurecimiento y espesor, en este caso el mayor de los tres, para dos tipos de aceros diferentes.

En la tabla 4.6 se recogen los 5 grupos de materiales.

		TIPO DE ACERO	ESPESOR (mm)	RED ACUM (%)	GRADO DE ENDURECIMIENTO (según ASTM 666)
A	A1	1.4301 (v1)	0,7	82,50	1/2
	A2		0,75	83,33	3/4
B	B1		2,3	61,67	1/4
	B2		2,4	60,00	1/2
C	C1	1.4301 (v1)	1,5	70,00	1/4
	C2	1.4301 (v2)			
D	D1	1.4301 (v1)	2,3	61,67	
	D2	1.4301 (v2)			
E	E1	1.4301 (v2)	2,7	48,00	
	E2	1.4310	2,6	55,00	

Tabla 4.6.- Materiales para ensayo HAZ

Las probetas necesarias para este ensayo se obtienen a partir de las muestras de las bobinas acopiadas fabricadas durante el año 2012. Las dimensiones y el número de probetas vienen contempladas en la descripción del ensayo HAZ en el punto de 4.2.11 de este capítulo.

#### **4.1.4. Materiales para soldadura TIG**

Los materiales utilizados para las pruebas experimentales de soldadura TIG son los incluidos en la tabla 4.6, excepto los correspondientes al grupo C.

Por limitaciones de tiempo y disponibilidad de los equipos, se han descartado las muestras del grupo C, dado que los materiales del grupo D cumplen las mismas variables a comprobar: tipo del material para un mismo espesor y acabado.

### **4.2. Equipos y descripción de ensayos**

La factoría de Acerinox Europa S.A.U. dispone de un conjunto de laboratorios: Acería, Químico, Corrosión, Ensayos mecánicos, Ensayos termomecánicos, y Metalografía. La actividad desarrollada en cada uno de ellos completa el estudio de los materiales en un amplio campo de la metalurgia.

Cada laboratorio dispone de una serie de equipos de medida que aportan los datos necesarios para la evaluación de los materiales y asegurar la calidad de los mismos.

Los equipos y métodos utilizados en este TFC incluidos en la tabla 4.7 se describen de forma detallada en este capítulo.



	EQUIPOS	ENSAYOS
1	Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X	Análisis composición química
2	Leco CS-200 y CS-600	Determinación de C y S
3	Leco TC-600	Determinación de N
4	Microscopio Olympus	Análisis microestructura Tamaño de grano
5	Ferritoscopio Ficherscope MMS	Medida del magnetismo
6	Máquina Universal de Zwick Roel Kortaues	Ensayo tracción a T <sup>a</sup> ambiente para determinación de las propiedades mecánicas: R <sub>m</sub> , R <sub>p0.2</sub> , A, módulo de Young, índices r y n.
7	Máquina de doblado	Aptitud al doblado de 180°
8	Rugosímetro Perthometer Mahr	Medida de la rugosidad media superficial
9	Durómetros Vickers y Rockwell	Dureza
10	Máquina de embutición Zwick/Roell	Ensayo índice Erichsen
11	Equipo de simulación termomecánico Gleeble 1500D	Ensayo Springback Ensayo simulación HAZ
12	Banco soldadura Euromatig 35-2	Aplicación método soldadura TIG

Tabla 4.7.- Ensayos y equipos empleados

#### 4.2.1. Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X

##### a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas

Este equipo es el método general para la determinación de la mayoría de los elementos de aleación de un material.

El *espectrómetro de fluorescencia de rayos X* es un equipo Philips PW 2600 compuesto por 12 canales de medición (Fe, Si, Mn, Sn, Ni, Cu, Cr, P, Mo, Ti, Nb, Co) distribuidos en dos niveles alrededor del tubo de rayos X a 29 y 44 grados respecto al plano de la superficie de la muestra, dispuesto verticalmente al eje del tubo de rayos-X, el cual se compone de un ánodo de rodio y una ventana de Berilio. Trabaja a una potencia de

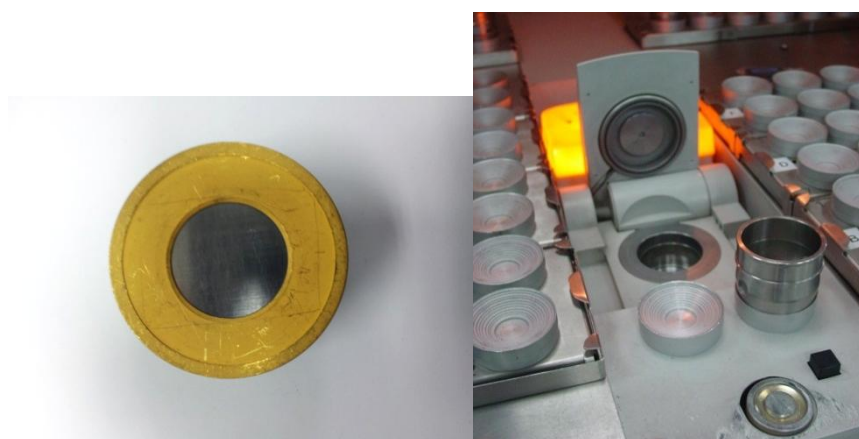
50kV y una intensidad de corriente eléctrica de 50mA. Para la detección de los rayos-X se utilizan dos canales: proporcional de gas y de estado sólido (centelleo).



*Figura 4.1.- Espectrómetro de fluorescencia de Rayos-X*

#### **b) Preparación y dimensión de las probetas**

La superficie de la muestra requiere de un pulido previo mediante fresa para minimizar el efecto de la rugosidad en los resultados. La dimensión de las probetas para este ensayo es de 33x33mm.



*Figura 4.2.- Casquillo porta-probeta para la determinación de la composición química mediante rayos-X*

### c) Procedimiento experimental

La composición química se obtiene a partir de la excitación de la muestra por la acción de los rayos-X y la emisión de su propio espectro fluorescente característico. Este espectro emitido suministra información para el análisis cualitativo y cuantitativo. Los análisis efectuados con este equipo se realizan siguiendo las instrucciones de la norma de trabajo interna correspondiente. [19]

#### 4.2.2. Equipos LECO para determinación de C y S

##### a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas

El análisis de carbono y azufre se ha realizado indistintamente en cualquiera de los dos determinadores automáticos de C/S de la marca LECO modelos CS-200 y CS-600. Ambos constan de las siguientes partes [19]:

- Determinador.
- Horno de inducción, 18 Mhz, 2.2 Kw (con posibilidad de rampas en el CS-600).
- Balanza analítica externa Sartorius 0.0001 a 61 grs. con sensibilidad  $\pm 0.1$  mg
- Monitor, teclado e impresora, y ordenador externo.

Las especificaciones del determinador marca LECO CS-200 son:

- Método de detección: Absorción por infrarrojos:
- Rango de medida
  - o C: 0,0002-3,5%, con una precisión de 1ppm.
  - o S: 0,0004-0,40%, con una precisión de 2ppm.

Las especificaciones del determinador marca LECO CS-600 son:

- Método de detección: Absorción por infrarrojos:
- Rango de medida
  - o C (rango alto): 6 ppm – 6 % con una precisión de 0,3 ppm.
  - o C (rango alto): 6 ppm – 0,5 % con una precisión de 0,3 ppm
  - o S: 6 ppm – 0,35 % con una precisión de 0,3 ppm

### **b) Preparación del ensayo y procedimiento experimental**

Para este ensayo, se obtienen virutas que posteriormente se introducen en un crisol de material cerámico para su fundición en el interior del horno de inducción.

Se trata de un método de análisis destructivo. Los análisis efectuados con este equipo se realizan siguiendo las instrucciones de la norma de trabajo interna de Acerinox Europa S.A.U. correspondiente.

Una vez cargado el crisol con el peso de viruta necesario, se introduce en el interior del horno, este se calienta por inducción hasta fundir el total de la muestra. Los gases producidos se transportan interiormente hasta la célula de detección de radiación infrarroja por medio de flujo de oxígeno.

En la primera célula se detecta el  $\text{SO}_2$  existente, cuya cantidad está directamente relacionada con el S de la muestra. Posteriormente se vuelve a calentar el gas para oxidar el  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  y eliminarlo mediante filtros. El CO producido en la combustión se oxida a  $\text{CO}_2$  el cual es detectado por la segunda célula.

El valor numérico que ofrece el equipo al finalizar el análisis está referido en tanto por ciento en masa y es el resultado de la comparación del valor obtenido con los valores de blanco y las muestras patrones. [19]

### **4.2.3. Equipo analizador para determinación de N y O**

#### **a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas**

El análisis de nitrógeno se realiza en el determinador automático de N/O de la marca LECO modelo TC-600, el cual consta prácticamente de los mismos componentes que el modelo anterior (determinador de S y C), utilizando también virutas para efectuar el análisis y a diferencia de los anteriores, el gas portador es de Helio y el crisol es de grafito [19].

### **b) Procedimiento experimental**

Este ensayo se basa en la diferencia de conductividad térmica del gas existente en la cámara de detección, antes y después del análisis.

La muestra se pesa mientras que el crisol se desgasifica dentro del horno. Una vez desgasificado se añade la viruta y se pone en marcha el procedimiento automatizado de análisis. Este procedimiento consiste en calentar la muestra y en desviar el gas desprendido (nitrógeno) hacia la cámara de detección, gracias a la diferencia de la conductividad eléctrica entre el nitrógeno y el helio.

El valor numérico (porcentaje en masa) es el resultado de comparar el valor de la carga generada con el resultado del blanco y de los patrones de calibración, además de la compensación debida al peso de la muestra.

#### **4.2.4. Microscopio óptico**

##### **a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas**

Para el análisis de la microestructura se utiliza el microscopio óptico Olympus modelo GX71 que se compone por un sistema óptico con cinco aumentos diferentes. Este microscopio tiene instalado un software de análisis (Analysis Inclusion Inspector) para:

- Análisis de la microestructura (para todos los aceros inoxidables)
- Medición del tamaño de grano (para los aceros inoxidables ferríticos y austeníticos)
- Recuento de fases (en el caso de los aceros inoxidables dúplex)



*Figura 4.3.- Microscopio óptico*

### **b) Probetas**

Las probetas tienen unas dimensiones de 33x33mm y requieren de una preparación metalográfica de la superficie previa a la observación en el microscopio.

En primer lugar se realiza un pulido grueso y seguido de uno fino. De este modo se consigue una superficie de acabado espejo, es decir, libre de rayas, zonas de deformación, manchas, etc.

El siguiente paso consiste en la aplicación de un ataque electroquímico que varía en función del tipo de acero y del ensayo a efectuar. Dado que todos los tipos de aceros utilizados en este TFC pertenecen a la familia de los aceros inoxidables austeníticos, a continuación se describe la metodología empleada para los mismos. Para revelar la estructura austenítica y realizar el posterior análisis de la microestructura, se realiza un ataque electroquímico con ácido oxálico durante unos segundos. Para la valoración del tamaño de grano se realiza un ataque electroquímico con ácido nítrico.

### **c) Procedimiento experimental**

En cuanto al *análisis de la microestructura*, la probeta se posiciona sobre la lente y se selecciona el aumento más adecuado. El microscopio lleva conectado un ordenador

que permite la captura de la fotomicrografía en la zona deseada de la muestra a partir del software incorporado.

La *medición del tamaño de grano* puede realizarse de forma manual o automática según la norma ASTM E-112 [6]. El procedimiento del método manual puede realizarse de dos formas: la primera consiste en valorar la estructura en evaluación por comparación con imágenes tipo grabadas en el ocular y la segunda, se valora la estructura contando el número de granos o límites de grano cortados por un segmento recto de una retícula de 1x1mm presente en el ocular. Los métodos automatizados para la valoración del tamaño de grano llevan un software específico instalado en el ordenador complementario al microscopio óptico, cuyo principio consiste en un reconocimiento inicial de la red de límites de grano. El resultado del tamaño de grano se indica según el índice G, donde a mayor índice G más fino es el grano.

#### **4.2.5. Ferritoscopio**

##### **a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas**

El ferritoscopio Fischerscope MMS consta de una unidad de control, circuitos de procesado y de una sonda manual.

##### **b) Probetas**

Este método no requiere de probetas con unas dimensiones predefinidas. Las probetas deben de presentar una superficie lisa y libre de impurezas.

##### **c) Procedimiento experimental**

Este ensayo se realiza para medir el porcentaje de la fase magnética de forma aproximada. Para ello, en primer lugar se pone en contacto la sonda con la muestra

de forma vertical. En esta sonda se aloja una espira conductora, de modo que al pasar una corriente alterna de baja frecuencia, genera un campo magnético alterno que penetra en el interior de la muestra. La interacción entre el campo magnético generado y la muestra da lugar a una corriente eléctrica alterna inducida en la espira de detección. El voltaje de dicha corriente es proporcional al contenido de ferrita existente en el volumen medido. El valor del contenido de magnetismo es la media aritmética de cinco medidas.

Existen varios factores que influyen en la medida: distancia entre la sonda y la superficie de la muestra, curvatura de la superficie, morfología de los granos de ferrita y distancia de la sonda al borde de la muestra. El ferritoscopio utilizado está calibrado en el rango 0.1 - 80% de ferrita.

#### **4.2.6. Máquina Universal de Zwick Roel Kortaues**

##### **a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas**

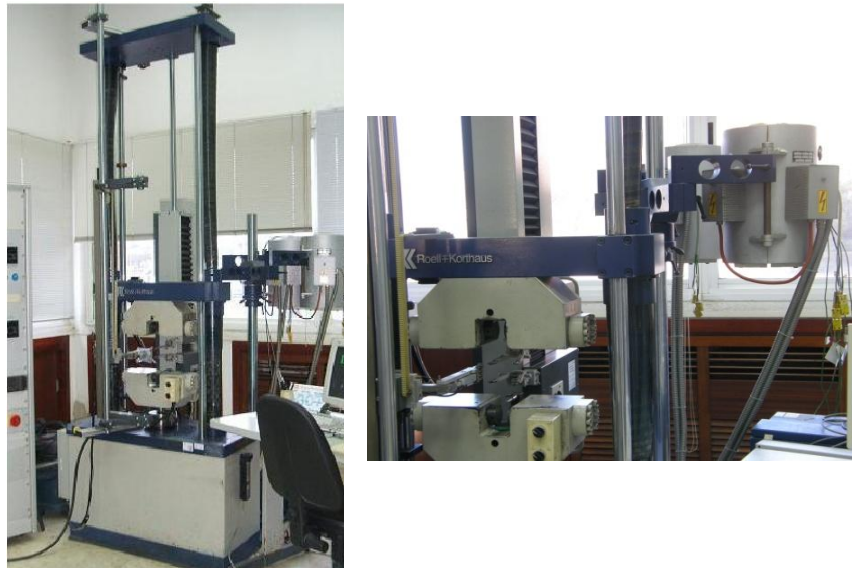
Se trata de una máquina universal de ensayos de tracción, compresión y doblado, marca Roell+Korthaus, modelo RKM-100 con electrónica digital y una capacidad máxima de 250kN. Este ensayo cumple con las especificaciones exigidas en la norma europea UNE EN ISO 6892-1 [55].

Este equipo dispone de los siguientes dispositivos auxiliares:

- *Unidad medidora* de la probeta de ensayo, con dos sistemas independientes: uno para el espesor y otro para el ancho.
- *Extensómetro longitudinal motorizado*, para la medida de la variación de la longitud de la probeta durante todo el ensayo (hasta rotura).
- *Extensómetro transversal* o normalmente denominado *contractómetro*, para la adquisición de los datos correspondientes a la variación en el ancho de la probeta hasta el final del ensayo.
- *Bastidor electromecánico* de doble husillo con una célula de carga de 100kN y unas mordazas hidráulicas paralelas.



- Hornos verticales capacitados para realizar ensayos de tracción a temperatura elevada hasta 1000°C.



*Figura 4.4.- Vista general máquina universal de ensayos de tracción (izda) y equipos auxiliares (mordaza y horno) (dcha)*

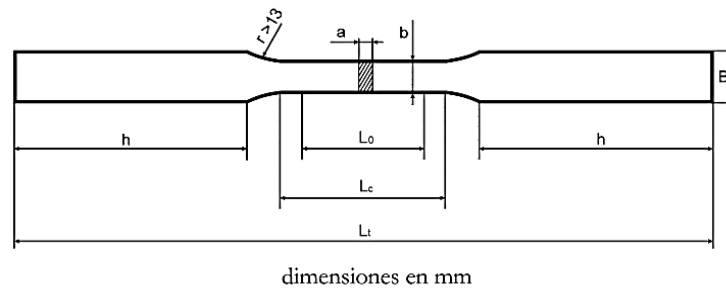
Algunas de las propiedades que se obtienen a partir de los ensayos realizados en este equipo son:

- Resistencia mecánicas ( $R_m$ )
  - Límite elástico al 0.2% y al 1%
  - Alargamiento hasta rotura
  - Índice  $r$  y exponente de endurecimiento  $n$
  - Coeficiente “ $k$ ”
  - Módulo de Young
  - Coeficiente de Poisson
- Ensayos disponibles:
    - Ensayo de tracción a temperatura ambiente en las tres direcciones al sentido de laminación.
    - Ensayo de tracción en caliente.
    - Ensayo de tracción con deformación libre (deformación equiaxial principal de la curva FLD- Curva límite de embutición)

- Ensayo de tracción con entalla (deformación equiaxial secundaria de la curva FLD- Curva límite de embutición)

### b) Probeta

La dimensión de las probetas empleadas en la máquina universal depende del ensayo, en este TFC se emplea este equipo para la ejecución del ensayo de tracción a temperatura ambiente. Para este ensayo, la dimensión de la probeta se muestra en la figura 4.5.



<i>a</i>	<i>b</i>	<i>B</i>	<i>h</i>	<i>Lc</i>	<i>L<sub>0</sub></i>	<i>Lt</i>	<i>Paralelismo</i>
<i>a</i> < 10	12,5 ± 0,25	20	105	60	50 ± 0,1	270	0,05

Figura 4.5.- Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción a temperatura ambiente [55]

Dónde:

- *a*: espesor inicial de la probeta
- *b*: ancho inicial de la parte calibrada de la probeta
- *L<sub>0</sub>*: longitud inicial de la probeta
- *L<sub>c</sub>*: longitud de la parte calibrada de la probeta
- *L<sub>t</sub>*: longitud total de la probeta
- *S<sub>0</sub>*: sección inicial de la probeta

Estas probetas van a tener una longitud inicial *L<sub>0</sub>* relacionada directamente con el área de la sección transversal inicial *S<sub>0</sub>* mediante la ecuación 4.1:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (4.1)$$

Dónde:

- k: coeficiente proporcionalidad
- $L_0$ : Longitud inicial
- $S_0$  : sección transversal inicial

**c) Procedimiento experimental del ensayo de tracción a temperatura ambiente.**

En este TFC se va a realizar el ensayo de tracción a temperatura ambiente en probetas obtenidas en las tres direcciones al sentido de laminación ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ) según la norma UNE EN ISO 6892-1 [55]. El ensayo consiste en someter una probeta a una fuerza de tracción en el eje longitudinal de la misma hasta rotura.

Para ello, en primer lugar se coloca la probeta de forma axial a la carga aplicada. El ensayo se realiza de forma automática mediante la configuración previa de un programa a partir del software TestExpert a partir del cual se generan los valores de las variables seleccionadas.

Gracias a la acción de un extensómetro y un contractómetro se adquieren los datos de la variación producida en el eje longitudinal y transversal de la probeta, respectivamente. De esta forma se obtienen los datos necesarios para la representación gráfica de las distintas curvas características:

- Curva ingenieril de tensión-deformación
- Curva real de tensión-deformación
- Curva logarítmica de tensión-deformación
- Representación de la zona elástica para la obtención del Módulo de Young y exponente de endurecimiento n.

A partir de este ensayo, en este TFC se han obtenido las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción ( $R_m$ ), límite elástico ( $R_{p0.2}$ ), alargamiento (A), módulo de young (E), coeficiente de anisotropía r y exponente de endurecimiento n.

La determinación del **coeficiente de anisotropía  $r$**  se basa en la norma ASTM E-517 [7] y se calcula a partir de la relación de tensión-deformación en el rango del 10% de la deformación de la longitud inicial. A partir de estos índices se calculan los valores de anisotropía media ( $r_m$ ) y planar ( $\Delta r$ ) según las ecuaciones 2.14 y 2.15.

Mediante la representación gráfica de los datos obtenidos de la tensión y la deformación en escala logarítmica, se ha calculado el **exponente de endurecimiento “ $n$ ”** según la norma ASTM E 646 [8]. En este TFC, el exponente “ $n$ ” corresponde al valor de la pendiente de la recta en el rango de deformación entre el 8-12%.

#### 4.2.7. Máquina de doblado

##### a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas

Está formado por una prensa equipada por dos dispositivos:

- De doblado, formado por un mandril y dos apoyos como.
- De prensado, compuesto por platos para ensayo de plegado.

Los materiales que forman esta máquina deberán tener una dureza suficiente para soportar la fuerza de doblado y la distancia entre los apoyos y la anchura del mandril deberá ser superior al ancho de la probeta.

##### b) Probeta

Las probetas son de sección rectangular y van a tener una dimensión de 150x40 mm. Además, requieren de una eliminación previa de las zonas afectadas por la deformación de corte (por ejemplo rebabas).

### c) Procedimiento experimental

Este ensayo se realiza según la norma UNE EN ISO 7-472-89 [46]. En primer lugar, se coloca la probeta sobre los apoyos y se aplica una fuerza creciente y continua. Si se observa alguna anomalía antes de alcanzar los 180° se debe retirar la probeta. Si la probeta llega a los 180° sin aparición de grietas ni ningún otro defecto, el material es apto al doblado a 180°.

Las condiciones de ensayo en este TFC son las siguientes:

- Radio de doblado:  $1/2 \cdot \text{espesor (mm)}$
- Distancia entre apoyos:  $4 \cdot \text{espesor} \pm 1/2 \cdot \text{espesor}$
- Ángulo de doblado: 180°

### 4.2.8. Rugosímetro

#### a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas

El equipo encargado de la medida de la rugosidad es el rugosímetro Perthometer Mahr que está equipado de una unidad de avance PRK con un recorrido de 1,5 mm y de 60 mm, y por dos tipo de palpadores con dos patines deslizantes esféricos para distintos rangos de medición. Dispone de una mesa estática y de un ordenador con el programa Perthometer Concept para el control del sistema y cálculo de los resultados.



*Figura 4.6.- Rugosímetro*

#### **b) Probeta**

La probeta debe presentar una superficie homogénea y sin deterioro por ambas caras. La dimensión requerida es de 100x100mm, permitiendo un buen asentamiento y la correcta la actuación de la aguja palpadora en todo el recorrido de la longitud de evaluación.

#### **c) Precedimiento experimental**

Este ensayo se basa en la norma UNE-EN-ISO 4287-99[51] y se aplica a todo el material de acero inoxidable que requiera verificar el estado del acabado superficial, cuya rugosidad media (Ra) sea inferior a 80  $\mu\text{m}$ .

En este TFC se mide el parámetro correspondiente a la rugosidad media superficial (Ra). Para ello, en primer lugar se limpian las muestras por ambas caras y se colocan sobre la mesa bien asentada de forma que la dirección de medida sea transversal a la dirección de laminación y que el recorrido de la aguja esté libre de desperfectos. Se baja la aguja hasta que toque la muestra ejerciendo una ligera presión. A continuación se determina la longitud de desplazamiento y la longitud de muestreo, que se divide

en siete partes iguales, desechándose la primera y la última, quedando cinco partes de longitud de muestreo para analizar.

Por último, se calculan los distintos parámetros utilizando el software del equipo y se imprime la gráfica con el perfil de rugosidad y los resultados.

#### 4.2.9. Durómetro Vickers y Rockwell

Estos equipos se utilizan, tal como su nombre indica, para la medida de la dureza. La principal diferencia entre ambos, es el espesor de la probeta. Para espesores menores o iguales a 2 mm se utiliza el durómetro Vickers y para espesores mayores de 2mm se utiliza Rockwell. Así mismo, cada uno de ellos tiene una subdivisión, para el primer caso cuando se trata de espesores menores o iguales a 0,7 mm se utiliza una carga de 2 kg (HV2) y para casos mayores de 0,7mm, se aplica una carga de 10kg (HV10), y para el segundo caso, para materiales más blandos se utiliza una fuerza de 100kg con un penetrador de bola de tungsteno (HRB) y para materiales mucho más duros se utiliza una fuerza de 150kg y un penetrador de cono de diamante (HRC) [19].

##### a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas

- *Durómetro Vickers*

Para escalas **HV0.025**, **HV1** y **HV2** se emplea un durómetro Vickers, marca Mitutoyo modelo HM 124 con cargas de 0,0005-0,001-0,002-0,003-0,004-0,005-0,01-0,025-0,05-0,1-0,2-0,3-0,5-1 y 2 kg. Control automático de cargas, tiempos, escalas, control estadístico, etc. Monitor y cámara de TV. Lentes intercambiables de x10, x20 y x100. Mesa de coordenadas X/Y con micrómetros de 0-25mm.

Para escalas **HV1** y **HV10** se emplea un durómetro Vickers, marca Akashi modelo AVK-A con cargas: 1-5-10-20 kg. El sistema está compuesto por un calculador HV con sistema de conversión modelo DME, una lente con 20 aumentos y un

ocular de 100 aumentos de ampliación. Tiene un terminal fijo marca Trakker Antares.



*Figura 4.7.- Durómetro Vickers*

- **Durómetro Rockwel B y C:** Tanto para escalas HRB como HRC se utiliza un durómetro marca Galileo modelo A-200. Además de las dos escalas antes mencionadas permite la medida de la dureza en HR15T y HR45T. Las cargas disponibles son: 15- 30- 45- 60- 100 y 150 kg.

#### **b) Probeta**

Las probetas deben presentar una superficie lisa y uniforme, libre de rebabas y de otros contaminantes o sustancias en la superficie. Para conseguir este acabado, las probetas se preparan previamente mediante un pulido con una lija de grano fino para mejorar la calidad superficial, de forma que pueda marcarse bien la huella y medir la longitud de las diagonales.

Este ensayo no requiere de unas dimensiones específicas, la única limitación es el espacio libre entre el penetrador y el yunque.



### c) Procedimiento experimental

Este ensayo consiste en medir la resistencia que opone un material a ser penetrado con una determinada carga, mediante la aplicación de una carga a partir de un penetrador realizando una huella sobre el material. Una vez realizada la huella se miden las dos diagonales y la dureza se determina en función de la escala en la que se esté midiendo (dureza en escala Vickers se obtiene a partir de la ec 4.2 y para la escala Rockwell se obtiene de forma manual). Para validar el valor de dureza, se realizan tres huellas con una separación mínima. El valor de la dureza final será el valor medio de las tres medidas.

- **Durómetro Vickers:** El ensayo de dureza Vickers se basa en la norma UNE-EN-ISO 6507-1 [38]. La característica principal de este equipo es que la carga se aplica mediante un penetrador de diamante tallado en forma de pirámide de base cuadrada y de 136° de ángulo entre las caras. El valor de la dureza se determina de forma automática a partir de la ecuación 4.2.

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{D^2} = 1,8544 \cdot \frac{F}{D^2} \quad (4.2)$$

Dónde:

- F: Carga aplicada (kgf)
  - D: Promedio de las diagonales (μm)
  - α: Ángulo del vértice del penetrador (136°)
  - S: Superficie de la huella (μm<sup>2</sup>).
- **Durómetro Rockwel B y C:** El ensayo de dureza Rockwel se basa en la norma UNE-EN-ISO 6508 [39]. Este ensayo se distingue del anterior en la forma de aplicación de la carga del penetrador. En este caso se aplican dos fuerzas: una precarga de 10kg, de forma que se ajuste el cero y una segunda de carga de 90kg (para HRB) y 140 kg (para HRC). El valor de la dureza Rockwell es función inversa a la profundidad de penetración de la bola (HRB) o del cono de diamante (HRC). El valor de dureza se determina de forma manual a partir de la escala incorporada en el equipo.

En este TFC se ha utilizado tanto el durómetro Vickers como el Rockwell debido a la variedad del rango de espesores seleccionado que varía entre 0,6 - 2,7mm. Para poder establecer una comparativa entre todos los materiales se ha empleado la tabla de conversión de dureza mostrada en la figura 4.8, convirtiendo todas las medida de dureza a escala Vickers.

Tabla de conversión de durezas Rockwell; Brinell; Vickers; Shore						
Rockwell C HRC	Brinell HB	Vickers HV	DUREZAS ROCKWELL			DUREZA SHORE
			ESCALA A HRA	ESCALA B HRB	ESCALA D HRD	
68	—	940	85,6	—	76,9	97
67	—	900	85,0	—	76,1	95
66	—	865	84,5	—	75,4	92
65	739	832	83,9	—	74,5	91
64	722	800	83,4	—	73,8	88
63	705	772	82,8	—	73,0	87
62	688	746	82,3	—	72,2	85
61	670	720	81,8	—	71,5	83
60	654	697	81,2	—	70,7	81
59	634	674	80,7	—	69,9	80
58	615	653	80,1	—	69,2	78
57	595	633	79,6	—	68,5	76
56	577	613	79,0	—	67,7	75
55	560	595	78,5	—	66,9	74
54	543	577	78,0	—	66,1	72
53	525	560	77,4	—	65,4	71
52	512	544	76,8	—	64,6	69
51	496	528	76,3	—	63,8	68
50	481	513	75,9	—	63,1	67
49	469	498	75,2	—	62,1	66
48	455	484	74,7	—	61,4	64
47	443	471	74,1	—	60,8	63
46	432	458	73,6	—	60,0	62
45	421	446	73,1	—	59,2	60
44	409	434	72,5	—	58,5	58
43	400	423	72,0	—	57,7	57
42	390	412	71,5	—	56,9	56
41	381	402	70,9	—	56,2	55
40	371	392	70,4	—	55,4	54
39	362	382	69,9	—	54,6	52
38	353	372	69,4	—	53,8	51
37	344	363	68,9	—	53,1	50
36	336	354	68,4	(109,0)	52,3	49
35	327	345	67,9	(108,5)	51,5	48
34	319	336	67,4	(108,0)	50,8	47
33	311	327	66,8	(107,5)	50,0	46
32	301	318	66,3	(107,0)	49,2	44
31	294	310	65,8	(106,0)	48,4	43
30	286	302	65,3	(105,5)	47,7	42
29	279	294	64,7	(104,5)	47,0	41
28	271	286	64,3	(104,0)	46,1	41
27	264	279	63,8	(103,0)	45,2	40
26	258	272	63,3	(102,5)	44,6	38
25	253	266	62,8	(101,5)	43,8	38
24	247	260	62,4	(101,0)	43,1	37
23	243	254	62,0	100,0	42,1	36
22	237	248	61,5	99,0	41,6	35
21	231	243	61,0	98,5	40,9	35
20	226	238	60,5	97,8	40,1	34
(18)	219	230	—	96,7	—	33
(16)	212	222	—	95,5	—	32
(14)	203	213	—	93,9	—	31
(12)	194	204	—	92,3	—	29
(10)	187	196	—	90,7	—	28
( 8)	179	188	—	89,5	—	27
( 6)	171	180	—	87,1	—	26
( 4)	165	173	—	85,5	—	25
( 2)	158	166	—	83,5	—	24
( 0)	152	160	—	81,7	—	24

Figura 4.8.- Tabla para la conversión de las distintas escalas de dureza [19]

#### 4.2.10. Máquina de embutición

##### a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas

La máquina universal de ensayos de embutición, marca Zwick/Roell modelo BUP 600 (figura 4.9) con una fuerza máxima de 600kN tiene una carrera de ensayo de 120mm y una velocidad máxima de 750mm/min, un disco y un punzón con diámetro de 100mm.

- Ensayos disponibles:

- Ensayo Erichsen
- Expansión de orificio KWI
- Ensayo de embutición profunda
- Ensayo Bulge: circular y elíptico
- Ensayo de embutición FUKUI

Ya que las probetas y el procedimiento dependen del ensayo a realizar. En este TFC se ha utilizado este equipo para la determinación del índice Erichsen descrito a continuación.



*Figura 4.9.- Máquina de embutición BUP600*

#### **b) Probetas para la determinación del índice Erichsen**

Las probetas tienen unas dimensiones de 90x270mm y un espesor en función de la muestra a ensayar, con un límite inferior de 0,2mm y superior de 3mm, excepto para el caso de los aceros endurecidos por deformación en frío que debido a su alta resistencia mecánica y bajo alargamiento, solo permite la realización de este ensayo para espesores menores o iguales a 2mm.

#### **c) Procedimiento experimental para la determinación del índice Erichsen**

Este ensayo se realiza para determinar la aptitud de un material a la deformación plástica por operaciones de estirado basado en la norma europea UNE-EN ISO 20482 [61]

Para llevar a cabo este ensayo, en primer lugar se engrasa la probeta con vaselina filante blanca por ambas caras antes de colocarla entre el pisador y la matriz. A continuación se aplica una fuerza de pisado a través de un punzón hasta que aparece una grieta. Por último se mide la profundidad de la penetración del punzón con una precisión de 0,1mm. El valor del índice de Erichsen es el resultado de la media aritmética de los valores obtenidos a partir de tres ensayos en una misma probeta (figura 2.21).

#### **4.2.11. Equipo para ensayos termomecánicos Gleeble 1500D**

El equipo de ciclos termomecánicos Gleeble (figura 4.10) es una potente herramienta para la simulación física de procesos. Este equipo consta básicamente de un sistema de control por ordenador y de dos servosistemas (térmico y mecánico), además de otros dispositivos auxiliares, como son la unidad de vacío y enfriamiento forzado, entre otros.



Figura 4.10.- Conjunto del equipo Gleeble 1500 de Acerinox Europa. S.A.U

#### a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas

El equipo está constituido por el siguiente equipamiento:

- **Sistema de control y toma de datos:**

El núcleo de la Gleeble 1500 es el sistema de control que proporciona todas las señales necesarias para programar los ciclos térmico y mecánico, además de controlar todos los accesorios auxiliares que hacen posible la operatividad de la máquina. El sistema incorpora un lenguaje específico para la programación de los distintos ensayos llamado “Gleeble Programming Language” (GPL), además incorpora una aplicación para la representación de datos “Data Plotting System”. Con las actualizaciones pertinentes realizadas al software del equipo, para la programación y control de los ensayos termomecánicos se utiliza la herramienta informática “*Quiksim*” y el “*Origin*” para la representación de los datos.

- **Sistema térmico:**

El sistema térmico se compone por un transformador de tensión constante que proporciona una corriente eléctrica de 50Hz. El mecanismo de calentamiento de la probeta según la configuración de la Gleeble es

mediante “Efecto Joule”, es decir, la probeta se calienta debido a la resistencia intrínseca del material al paso de la corriente eléctrica. El circuito eléctrico está formado desde el transformador hasta las mordazas. El sistema autoregula la señal térmica de feedback gracias a la señal enviada por un termopar de control soldado en la probeta y conectado a la toma de datos del sistema. Los termopares que se utilizan son de tipo K (cromel/alumel) o de tipo S (Pt/PtRh10%).

Las *prestaciones* del sistema térmico son las siguientes:

- Variable de control = Temperatura
- Velocidad máxima de calentamiento = 10000 °C/s
- Velocidad mínima de calentamiento = Régimen estacionario
- Exactitud del servosistema =  $\pm 1$  °C en equilibrio,  $\pm 2$  °C a 150°C/s y  $\pm 10$  °C a 1500 °C/s
- Velocidad máxima de enfriamiento = 300 °C/s (por conducción) y 5000 °C/s (con sistema auxiliar)
- Exactitud del termopar =  $\pm 1$  °C
- Velocidad de respuesta del termopar = 2000 °C/s

● **Sistema mecánico:**

Se basa en un servosistema hidráulico que utiliza una bomba de desplazamiento variable de doble rango y baja velocidad, que suministra aceite a un actuador (pistón) acoplado a una de las mordazas en la unidad de carga horizontal. Las mordazas de sujeción de las probetas forman parte del sistema mecánico, son de tipo de cuña, refrigeradas por agua, y están montadas en dos puentes sobre ejes-guía. El puente derecho está fijado a las guías, y el izquierdo se desplaza mediante la acción del actuador hidráulico.

Por último, se encuentra el sistema combinado de control y medición. Se pueden medir cuatro variables: fuerza, desplazamiento, deformación transversal y deformación longitudinal. Una quinta variable, la tensión, se

genera dividiendo la señal de fuerza por el área de la probeta.

Las *prestaciones* del sistema mecánico son las siguientes:

- Variable de control = Desplazamiento, deformación longitudinal, deformación transversal y fuerza (y Tensión)
- Carga máxima en tracción o compresión = 80000 N
- Carga máxima en fatiga =  $\pm 53000$  N
- Rango bajo de presión hidráulica = 7 MPa
- Rango alto de presión hidráulica = 21 MPa
- Desplazamiento máximo = 100 mm
- Velocidad máxima de mordazas = 1200 mm/s

- **Unidad de vacío:**

El sistema de vacío de la Gleeble 1500D alcanza un vacío de 1Pa en la cámara de ensayo gracias a la acción de una bomba rotaria con una capacidad de bombeo de 160 l/min.

- **Unidad de enfriamiento forzado:**

Algunos ensayos requieren de un enfriamiento superior al que el programa permite. Por ello, este equipo dispone de unos sistemas auxiliares de enfriamiento que utilizan como medios refrigerantes agua, aire o una mezcla de ambos, a partir de un sistema de duchas. Existen diferentes modelos de duchas en función de la probeta utilizada o el ensayo de simulación, y pueden ser verticales u horizontales (figura 4.11).



*Figura 4.11.- Sistema de ducha vertical (izda) y horizontal (dcha)*

El sistema Gleeble permite la realización de multitud de ensayos o simulaciones para los que dispone de diversos conjuntos de mordazas y accesorios para adaptarse a los distintos formatos de probeta posibles (figura 4.12).

Algunos de los procesos metalúrgicos que se pueden estudiar en el sistema Gleeble son:

- Soldadura
- Simulación de procesos de fabricación: Colada continua y laminación en caliente
- Tratamientos térmicos
- Estudio problemas de fluencia, fatiga y ductilidad
- Análisis curvas TTT y CCT
- Fusión y solidificación
- Deformabilidad



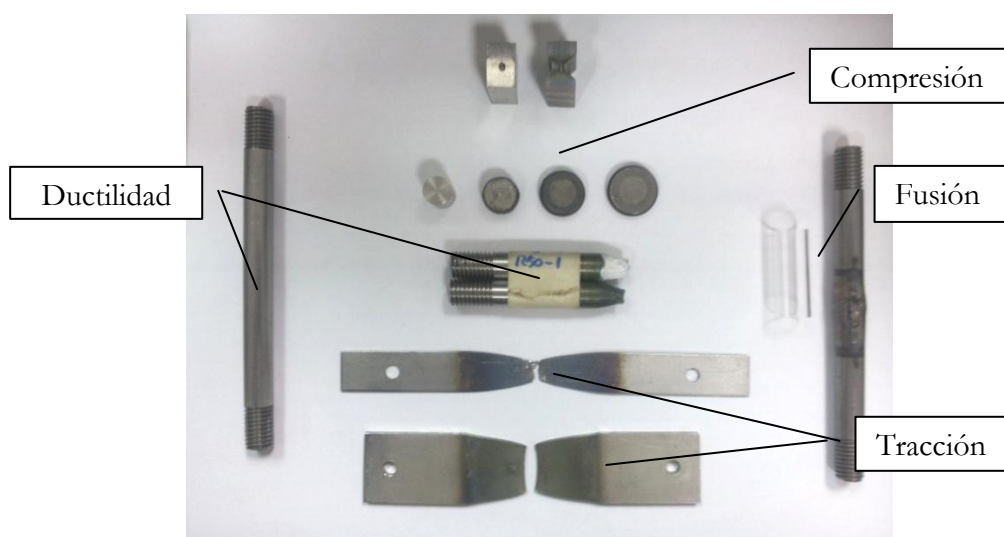


Figura 4.12.- Muestras ensayadas en la máquina de simulación termodinámica Gleeble 1500D

En este TFC se ha utilizado este equipo para la realización de dos ensayos: “Determinación de la recuperación elástica o *springback*” y “Ensayo simulación HAZ”. Ya que, el uso de este equipo varía en función de su aplicación, a continuación se describen los procedimientos seguidos en función de dichos ensayos.

## - ENSAYO DETERMINACIÓN DE LA RECUPERACIÓN ELÁSTICA O SPRINGBACK

### a) Probeta

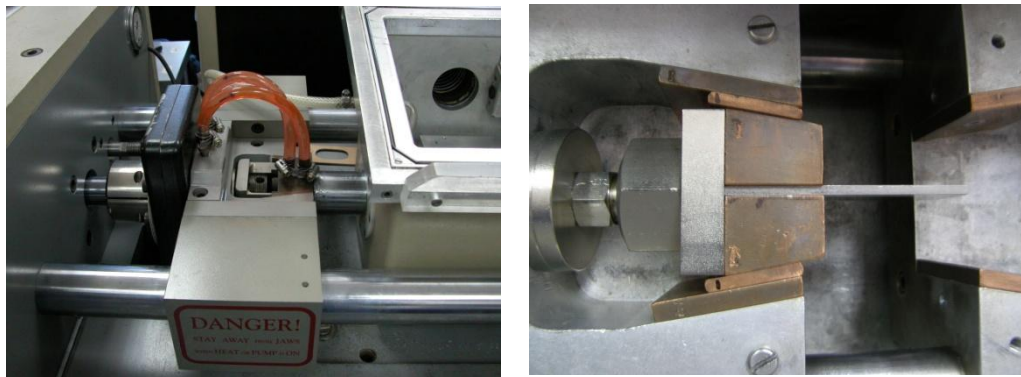
Las probetas utilizadas para la determinación de la recuperación elástica o *springback* son rectangulares con unas dimensiones de 18x110mm

### b) Procedimiento experimental

El ensayo de *springback* es un ensayo experimental que no está contemplado en ninguna norma europea ni española, con un alto grado de innovación. Consiste en la acción mecánica de un punzón a una determinada fuerza sobre la chapa a ensayar.

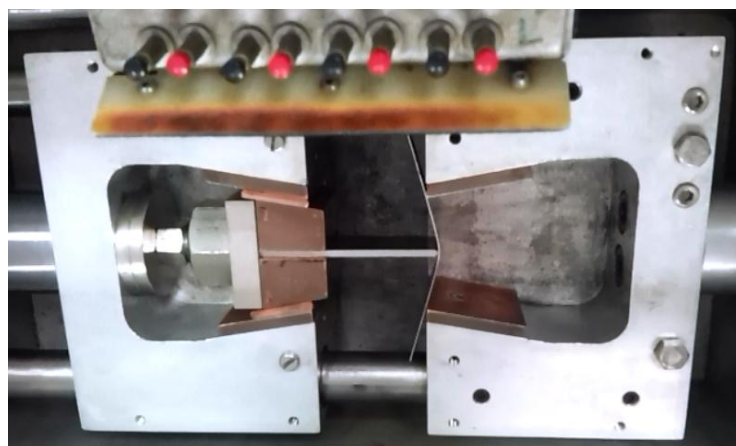
Para la cuantificación del springback, en primer lugar se ha configurado un programa de ensayos mediante la herramienta informática Quicksim con las condiciones del ensayo y la adquisición de los datos correspondiente. Mediante esta configuración se ha establecido un desplazamiento del punzón de 30 mm con una fuerza determinada.

El punzón se dispone entre los cobres del extremo izquierdo de la máquina (parte conectada al puente móvil) y actúa a partir de la señal mecánica (figura 4.13):



*Figura 4.13.- Puente móvil (izda) y punzón para springback (dcha)*

A continuación se disponen entre los cobres del extremo derecho la probeta, tal como se muestra en la figura 4.14. Tras la puesta en marcha del ensayo, la probeta se dobla hasta conseguir una distancia entre las ramas de 67mm (calculados geométricamente por la disposición de los útiles del equipo).



*Figura 4.14.- Ejecución del ensayo de springback*

Tras realizar el ensayo se mide la distancia entre los extremos de la probeta ensayada. De esta forma la recuperación elástica en tanto por ciento se calcula mediante la ecuación 4.4:

$$SPB(\%) = \frac{D_f - D_i}{D_i} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Dónde:

- SPB: Recuperación elástica (%)
- $D_f$ : Distancia final entre ramas tras producirse la recuperación elástica (mm)
- $D_i$ : Distancia inicial entre ramas (67mm).

Además, se determina la tensión empleada a partir de la fuerza generada por el punzón en la probeta (ec 4.5).

$$\sigma = \frac{F - F_{roz}}{w \cdot t} \cdot 9,8067 \frac{N}{kgf} \quad (4.5)$$

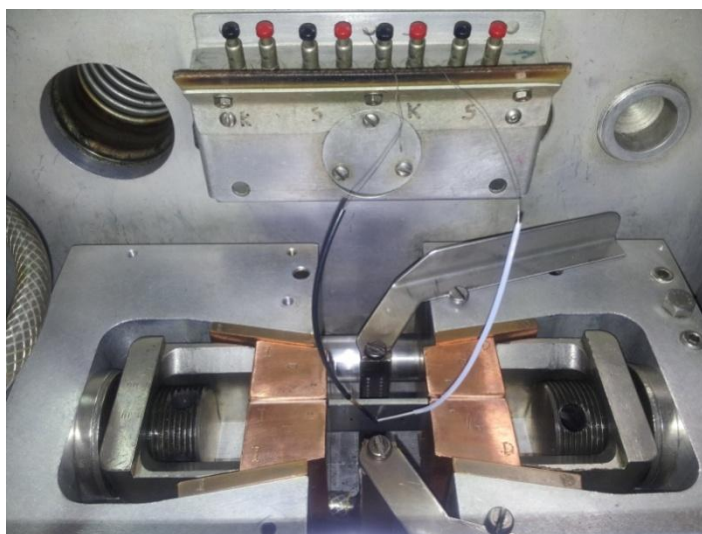
Dónde:

- $\sigma$ : tensión (MPa)
- F: fuerza máxima alcanzada por la probeta ensayada (kgf)
- $F_{roz}$ : Fuerza rozamiento (35kgf)
- w: Ancho (mm)
- t: Espesor (mm)

## - ENSAYO DE SIMULACIÓN DE LA HAZ

### a) Probetas

Los materiales empleados para el estudio del comportamiento del material en la zona afectada térmicamente (HAZ) son los mostrados en la tabla 4.6 de este capítulo. La dimensión de las probetas para este ensayo ha sido de 20x100mm para tener una distancia entre mordazas de 40mm. En la figura 4.15 se muestra la disposición de la probeta entre las mordazas.



*Figura 4.15.- Colocación de la probeta para el ensayo de simulación HAZ*

#### **b) Procedimiento experimental**

El ensayo de simulación HAZ consiste en someter la probeta a un ciclo térmico de soldadura en un punto a una distancia dada del cordón. Para ello, el equipo de simulación termodinámica Gleeble 1500D lleva integrado un software denominado “HAZ” que permite la simulación de la zona afectada térmicamente a partir de la curva de enfriamiento que experimenta el material tras el proceso de soldadura para unas condiciones determinadas.

Este estudio se realiza para evaluar la influencia del input térmico sobre las características de diferentes materiales con distinto grado de endurecimiento en diferentes puntos desde el centro del cordón de la soldadura en la HAZ.

Para llevar a cabo este proceso de simulación se elige el modelo de enfriamiento Rosenthal que permite obtener la temperatura pico ( $T_p$ ) y la curva de enfriamiento de la soldadura en un punto determinado. Para la configuración de este programa se ha tenido en cuenta para los tres tipos de aceros, las propiedades físicas del EN 1.4301, mostradas en la tabla 4.8, ya que es el tipo de acero más extendido y los otros dos tipos son una variación de este.

SÍMBOLO	DEFINICIÓN	UNIDADES	VALOR
$\lambda$	Conductividad térmica	(J/s m °C)	21,5
$\rho$	Densidad	(kg/dm <sup>3</sup> )	7,9
c	Calor específico	(J/kg°C)	500
$\rho c$	Calor específico por unidad de volumen	(J/m <sup>3</sup> °C)	3.950
v	Travel speed	(cm/s)	0,5
q/v	Input Térmico	kJ/mm	1,5
T <sub>M</sub>	Temperatura de Fusión	°C	1.510

Tabla 4.8.- Propiedades físicas del tipo de acero EN 1.4301 [24]

En este estudio se han seleccionado **dos inputs térmicos** y **dos puntos** situados a diferente distancia del centro del cordón de soldadura para los cinco grupos de materiales, de forma que se obtiene cuatro programas de ensayo HAZ por cada material.

- Para la determinación de los **dos inputs térmicos** se parte de un valor de input térmico de 15 kJ/cm orientativo (según bibliografía), eligiéndose finalmente los valores de 12,5 y 7,2 kJ/cm. Las condiciones de soldeo tenidas en cuenta para la simulación HAZ se muestran en la tabla 4.9.

	INPUT (kJ/cm)	INTENSIDAD (A)	TENSIÓN (V)	VEL SOLDEO (mm/min)	VEL SOLDEO (cm/s)
1	7,2	200	17,92	300	0,5
2	12,5	250	19,94	239,28	0,399

Tabla 4.9.- Condiciones de soldeo para el estudio de simulación HAZ

- Por otro lado, para estudiar el comportamiento del material tras un proceso de soldadura, se establecen **dos puntos**, uno cerca del cordón y otro cercano al material base. De esta forma se recoge información del estado del material en un amplio rango del ciclo térmico.

A continuación se describe de forma detallada la configuración del **programa de simulación HAZ** llevado a cabo en este TFC [36].

1. Preparación de la probeta y disposición de la misma en la Gleeble 1500D.

La probeta se dispone entre las mordazas de cobre. Las mordazas de cobre utilizadas en este ensayo son de 30 x 50 mm, con un pasante de 6 mm el medio. De esta forma, la probeta queda apoyada sobre dicho pasante quedando totalmente en contacto con el cobre, consiguiendo que la corriente eléctrica pase por igual en todo el largo de la probeta.

Además de las mordazas de cobre, se incorpora un sistema de refrigeración vertical de aire a presión que entra en acción de forma manual en el momento del ensayo en el que la probeta alcanza la temperatura de máxima o de pico.

2. Creación del programa HAZ mediante la aplicación QuickSim instalada en el sistema y guardado del mismo con el nombre correspondiente
3. A continuación, aparece una ventana en la que se definen los parámetros deseados para en el ensayo HAZ:

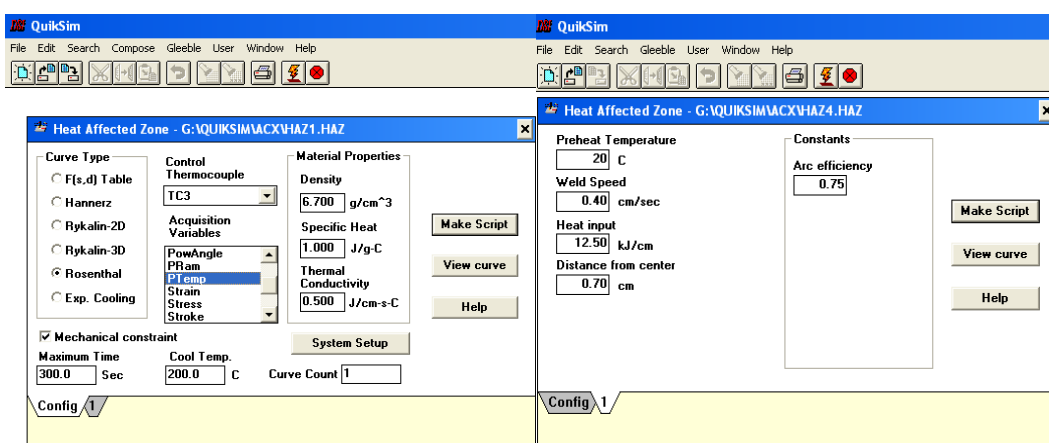


Figura 4.16.- Configuración del programa de simulación HAZ

## 4. Introducción de los datos en la ventana del programa HAZ.

En la *pestaña configuración* se selecciona el tipo de curva Rosenthal (figura 4.17), con el fin de obtener mediante la ejecución del programa HAZ, la temperatura de pico y la curva de enfriamiento.

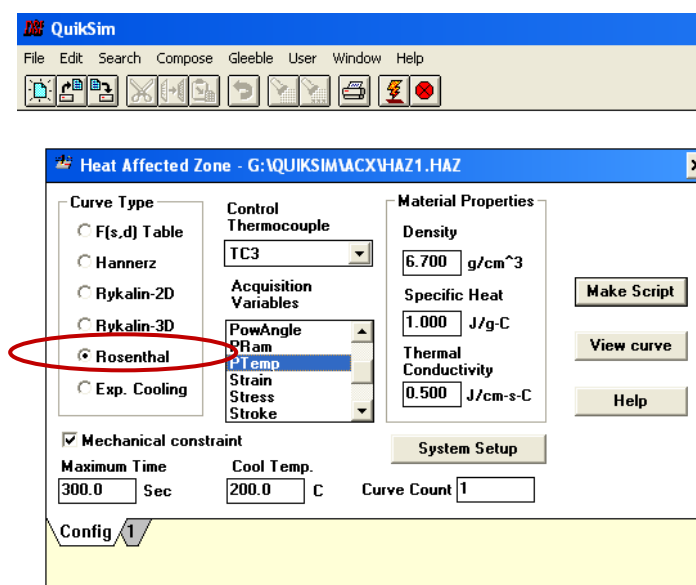


Figura 4.17.- Elección del tipo de curva de enfriamiento

Este método está basado en el trabajo del doctor Rosenthal [36], donde a partir de la temperatura de precalentamiento, la velocidad de soldadura, el input térmico, la distancia desde el centro y la eficiencia, se genera la curva de enfriamiento para siguiendo la siguiente ecuación (ec 4.6):

$$T - T_0 = \frac{Q \cdot \eta}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot r} \exp[-\lambda v(r - vt)] \quad (4.6)$$

Dónde:

- Q: Potencia (J/s)
- $\eta$ : Eficiencia ( $\eta=0,75$ )
- v: Velocidad de soldeo (cm/s)
- r: distancia desde la fuente de punto móvil

En cuanto al termopar de control (TC), se ha seleccionado uno configurado para tipo k. Este tipo de TC está constituido por una aleación de Ni-Cr llamada Cromel y una aleación de Ni-Al llamada Alumel, sirve para una amplia variedad de aplicaciones con un rango de temperatura de -200 °C a +1.372 °C, y una buena resistencia a la oxidación.

Además en este punto se eligen las variables que se quieren adquirir los cuales son los datos del programa térmico y los del TC.

Por otro lado, se introducen las siguientes propiedades físicas del material (acero inoxidable austenítico 1.4301):

- Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- Calor específico ( $\text{J}/\text{g}^\circ\text{C}$ )
- Conductividad térmica ( $\text{J}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ )

En la *pestaña 1* se introducen los datos requeridos para el tipo de curva Rosenthal, tal como se muestra en la figura 1.

La configuración de los cuatro programas HAZ se expone en la tabla 4.10:



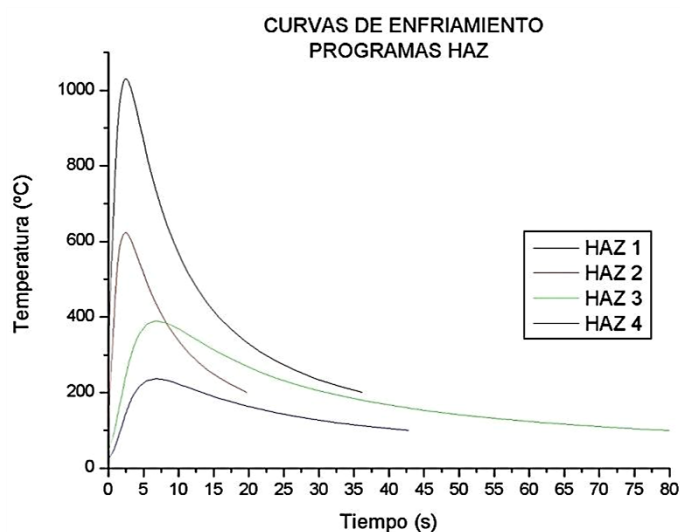
VARIABLE	UNIDAD	HAZ 1	HAZ 2	HAZ 3	HAZ 4
Pestaña Configuración					
Densidad	g/cm³	7,9			
Calor específico	J/g°C	0,5			
Conductividad térmica a 500°C	J/cm·s·°C	0,215			
Pestaña 1					
Temperatura de precalentamiento	°C	20			
Velocidad de soldeo	cm/s	0,4	0,5	0,4	0,5
Input Térmico	kJ/cm	12,5	7,2	12,5	7,2
Distancia desde el centro	Cm	0,7		1,2	
Eficiencia Térmica	-	0,75			
Temperatura pico	°C	1030	623	389	236

*Tabla 4.10.- Condiciones para la configuración de los cuatro programas de simulación HAZ*

5. Representación gráfica de la curva de enfriamiento.

A partir del icono View Curve se genera la curva de enfriamiento que experimenta el material en la HAZ tras la simulación del proceso de soldadura en el punto elegido. A partir de dicha curva, se obtiene la temperatura máxima o de pico.

Las curvas de enfriamiento de los cuatro programas HAZ se muestran en la figura 4.18:



*Figura 4.18.- Representación de las cuatro curvas de enfriamiento resultantes según la configuración de cada programa de simulación HAZ*

#### 6. Ejecución del ensayo.

Por último, cabe destacar que el ensayo de simulación HAZ se ha realizado por primera vez en la Gleeble 1500D de Acerinox Europa S.A.U para este TFC. En este sentido, uno de los objetivos implícitos en este TFC es la puesta a punto de los cuatro programas HAZ. Para ello se realizaron distintas pruebas con distintos sistemas de enfriamiento hasta conseguir que la probeta siguiera la curva de enfriamiento programada. Finalmente se optó por el uso del dispositivo auxiliar de duchas verticales con una elevada presión de aire, sobre todo en los programas HAZ 1 y HAZ 2, cuyas temperaturas pico son de 1030 y 623°C.

Tras la realización de los cuatro ensayos de simulación HAZ a todos los materiales seleccionados, se evalúa la estructura resultante y el tamaño de grano mediante el uso del microscopio óptico; y a nivel de propiedades mecánicas, dada la dimensión de las muestras, se mide la dureza mediante el durómetro Vickers en la sección de la zona correspondiente al termopar de control.

#### 4.2.12. Banco de soldadura Euromatig 35-2

En este TFC se evalúa el comportamiento del material tras la aplicación de un proceso de soldadura TIG según las pautas establecidas en la norma europea EN 15614-1:2005 *“Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos”* [60]

El procedimiento de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible, también llamado Tungsten Inert Gas (TIG) tal como se explicó en el capítulo 2, utiliza como fuente de energía el arco eléctrico producido entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte (Ar) protege el baño de fusión. El material de aportación, cuando es necesario, se aplica mediante el empleo de varillas (figura 4.19).



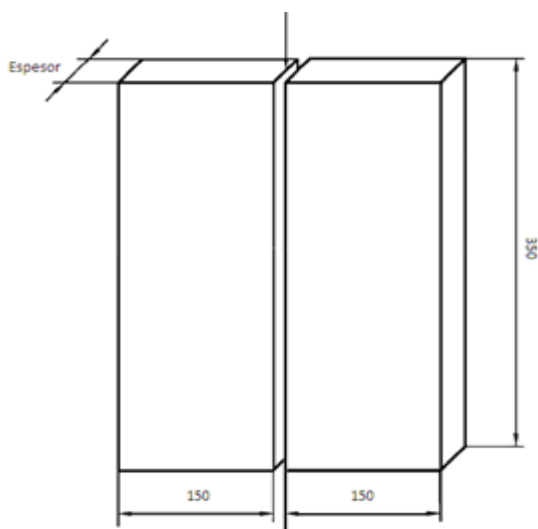
*Figura 4.19.- Banco de soldadura TIG*

##### **a) Descripción del equipo y especificaciones técnicas**

El equipo de soldadura TIG Euromatig 35-2 consta de un módulo de programación RC124, un caudalímetro automático para control del gas de arco piloto (gas ionizador), un gas de protección GS-B-33, dos pistolas semi-automática: Plasma y TIG, una pistola para soldadura manual TIG y un equipo de refrigeración.

**b) Probeta**

La dimensión de la probeta es de 150x350mm según la norma UNE EN ISO 15614-1[60] mostrada en la figura 4.20.



*Figura 4.20.- Dimensiones de las muestras para la soldadura TIG [25]*

**c) Procedimiento experimental**

Los materiales seleccionados para la soldadura TIG sin aporte en este TFC son los descritos en el punto 4.1.4 de este capítulo.

Para la ejecución de este ensayo, en primer lugar, se realiza el programa automático donde se establecen las condiciones de soldeo. Los parámetros a considerar son:

- Preflujo (tiempo de soplado de Argón para conseguir inertizar la zona de soldadura)
- Corriente inicial (pendiente hasta alcanzar la intensidad de set-point)
- Corriente eléctrica, es decir, intensidad de soldadura (Tabla 4.12)
- Corriente de pulso fija.
- Postflujo (tiempo de soplado de Argón al final de la soldadura hasta disminuir la temperatura del cordón de soldadura)

Mediante el carro automático, se controlan las siguientes variables:

- Longitud de arco (distancia entre electrodo y el material a soldar) de 2mm aproximadamente en este TFC.
- Longitud de soldadura (programación de la longitud del cordón de soldadura) de 350mm en este TFC.
- Velocidad de soldeo (mostrada en la tabla 4.12)

Las condiciones de soldeo iniciales utilizadas son las establecidas a partir del estudio previo de simulación de la HAZ en el equipo Gleeble 1500D. Tras la evaluación de los resultados obtenidos del estudio de la simulación HAZ, se deduce que las condiciones iniciales óptimas son las mostradas en la tabla 4.11:

Condición Soldeo	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. Solder (cm/s)	Input (kJ/cm)
1	200	17,92	0,5	7,2

*Tabla 4.11.- Condiciones de soldeo óptimas obtenidas a partir del estudio de simulación de la HAZ en el equipo Gleeble 1500D*

A continuación, se realizan unas pruebas en el banco de soldadura con los tres tipos de aceros con distinto grado de endurecimiento y espesores, partiendo de las condiciones iniciales de la tabla 4.11. En primer lugar se introducen en el programa los valores de los parámetros necesarios para la ejecución de la soldadura TIG.

Una vez introducidas las condiciones de soldadura, la realización de la soldadura TIG se lleva a cabo mediante la colocación manual en el banco de soldadura de las dos chapas a soldar, de forma que queden enfrentadas una delante de la otra y centradas. Estableciendo la distancia correcta de la longitud de arco se consigue que la pieza tenga una adecuada penetración y distribución del calor. Por último se sueldan las dos piezas.

Tras esta primera prueba, se observa que las condiciones de partida solo son adecuadas para los materiales de los grupos B y D con espesores de 2,3-2,4 mm. En el caso de los materiales de espesores finos (0,7mm y 0,75mm) se aportó demasiado

calor al material; y en el caso de los espesores más gruesos (2,6mm y 2,7mm) se produjo falta de penetración en el cordón. Para obtener las condiciones óptimas para todos los materiales según el espesor se continuó con la realización de una serie de pruebas. Las condiciones finales de soldadura TIG empleadas en este TFC se muestran en la tabla 4.12

ID	Espesor (mm)	Intensidad (A)	Tensión (V)	Velocidad de soldeo (cm/s)	Input térmico (kJ/cm)
A1	0,7	45	16,71	0,5	1,5
A2	0,75	45	16,71	0,5	1,5
B1	2,3	200	17,92	0,5	7,2
B2	2,4	200	17,92	0,5	7,2
D1	2,3	200	17,92	0,5	7,2
D2	2,3	200	17,92	0,5	7,2
E1	2,7	230	19,13	0,5	8,8
E2	2,6	230	19,13	0,5	8,8

*Tabla 4.12.-Condiciones de soldeo de los distintos materiales para la realización de la soldadura TIG*

Para verificar la calidad de la soldadura y el correcto comportamiento de la unión soldada, en primer lugar se realiza una inspección visual en la que se comprueba la penetración óptima del cordón y la posible presencia de impurezas superficiales (como óxidos, cascarilla, residuos de aceite, etc.). A continuación según la norma UNE-EN 15614-1 [60], se indica el esquema de corte para la realización de los siguientes ensayos (figura 4.21):

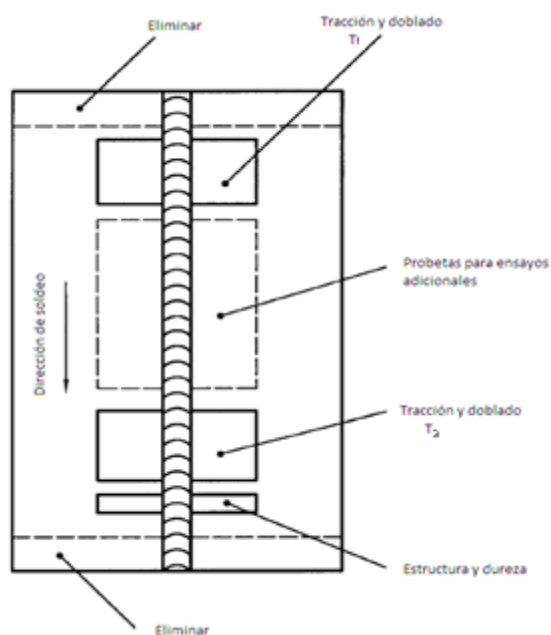


Figura 4.21.- Ensayos exigidos por la norma UNE-EN 15614-1 para la verificación de la calidad de la unión soldada [60]

Los ensayos exigidos por la norma son:

- **Análisis de la estructura** que se realiza según la UNE-EN 1321:1997 [47]

En este TFC, se analiza la macroestructura y la microestructura en las escalas adecuadas para cada espesor (para los espesores finos se utiliza un aumento de 15 y para los espesores gruesos un aumento de 7 en el caso de la macroestructura y en para el análisis microestructural, para los espesores finos se utiliza un aumento de 75 y para los gruesos un aumento de 120), de forma que se observa el cordón de la soldadura, la zona afectada térmicamente (HAZ) y el material base. Además de la microestructura, se ha valorado el tamaño de grano en la zona afectada térmicamente.

- **Ensayo de tracción** según la norma UNE-EN 4136:2013 [50]

Esta norma diferencia las dimensiones de las probetas en función del espesor del material. Los espesores de las muestras soldadas en este TFC varían entre

0,7-2,7 mm. La tabla 4.13 recoge las dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción transversal según la figura 4.5 de este capítulo.

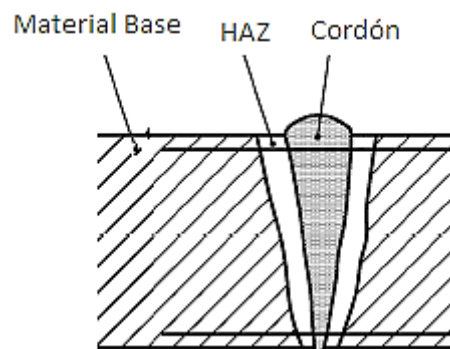
	B (mm)	b (mm)	L <sub>0</sub> (mm)	Ancho cordon (mm)	Lc (mm)	Lt (mm)
Espesor <2mm	24	12	50	5	60+5	300
Espesor >2mm	37	25	50	10	60+10	300

*Tabla 4.13.- Dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción transversal a temperatura ambiente de la unión soldada.*

- **Ensayo de doblado** según la UNE-EN 5173:2011 [52].

La norma especifica la realización de un ensayo de doblado con un ángulo de 180° de cara y otro ensayo de doblado de raíz.

- **Dureza** según la UNE-EN 9015-2:2011 [56], en los puntos de la unión indicados en la figura 4.22.



*Figura 4.22.- Esquema para la medida de la microdureza de las uniones soldadas*



# **CAPÍTULO 5**

---

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Revisión bibliográfica y estudio estadístico de los requisitos y especificaciones de los acabados endurecidos por deformación en frío.

#### 5.1.1. Resultados de la revisión bibliográfica de la normativa aplicable

En primer lugar, la designación empleada en Acerinox Europa S.A.U. se basa en la norma americana ASTM A666 “Standard Specification for Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar” [4]. Esta norma establece los valores mínimos de composición química y propiedades mecánicas que deben cumplir los distintos tipos de aceros inoxidable austeníticos, según el grado de endurecimiento. Las propiedades mecánicas de los distintos grados de endurecimiento se recogen en la tabla 2 de dicha norma (tabla 5.1).

Type	UNS Designation	¼ Hard						
		Tensile Strength, min		Yield Strength, min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %		
		psi	MPa	psi	MPa	<0.015 in.	≥0.015 to ≤0.030 in.	>0.030 in.
201	S20100	125 000	860	75 000	515	25	25	25
201L	S20103	120 000	825	75 000	515	25	25	25
201LN	S20153	120 000	825	75 000	515	25	25	25
202	S20200	125 000	860	75 000	515	12	12	...
...	S20400	140 000	965	100 000	690	20	20	20
205	S20500	125 000	860	75 000	515	45	45	45
301	S30100	125 000	860	75 000	515	25	25	25
301L	S30103	120 000	825	75 000	515	25	25	25
301LN	S30153	120 000	825	75 000	515	25	25	25
302	S30200	125 000	860	75 000	515	10	10	12
304	S30400	125 000	860	75 000	515	10	10	12
304L	S30403	125 000	860	75 000	515	8	8	10
304N	S30451	125 000	860	75 000	515	12	12	12
304LN	S30453	125 000	860	75 000	515	10	10	12
316	S31600	125 000	860	75 000	515	10	10	10
316L	S31603	125 000	860	75 000	515	8	8	8
316N	S31651	125 000	860	75 000	515	12	12	12
XM-11	S21904	130 000	895	115 000	795	15	15	...

Type	UNS Designation	½ Hard						
		Tensile Strength, min		Yield Strength, min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %		
		psi	MPa	psi	Mpa	<0.015 in.	≥0.015 to ≤0.030 in.	>0.030 in.
201	S20100	150 000	1035	110 000	760	15	18	18
201L	S20103	135 000	930	100 000	690	22	22	20
201LN	S20153	135 000	930	100 000	690	22	22	20
205	S20500	150 000	1035	110 000	760	15	18	18
301	S30100	150 000	1035	110 000	760	15	18	18
301L	S30103	135 000	930	100 000	690	20	20	20
301LN	S30153	135 000	930	100 000	690	20	20	20
302	S30200	150 000	1035	110 000	760	9	10	10
304	S30400	150 000	1035	110 000	760	6	7	7
304L	S30403	150 000	1035	110 000	760	5	6	6
304N	S30451	150 000	1035	110 000	760	6	8	8
304LN	S30453	150 000	1035	110 000	760	6	7	7
316	S31600	150 000	1035	110 000	760	6	7	7
316L	S31603	150 000	1035	110 000	760	5	6	6
316N	S31651	150 000	1035	110 000	760	6	8	8

Type	UNS Designation	¾ Hard						
		Tensile Strength, min		Yield Strength, min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %		
		psi	MPa	psi	MPa	<0.015 in.	≥0.015 to ≤0.030 in.	>0.030 in.
201	S20100	175 000	1205	135 000	930	10	12	12
205	S20500	175 000	1205	135 000	930	15	15	15
301	S30100	175 000	1205	135 000	930	10	12	12
302	S30200	175 000	1205	135 000	930	5	6	6

Tabla 5.1.- Propiedades mecánicas aceros ¼, ½ y ¾ duro según ASTM 666 [4]

A nivel europeo y español, la designación de los materiales con acabado endurecido por deformación en frío se determina mediante el acabado 2H según la norma UNE-EN 10088-2, que significa “endurecido por medios mecánicos” e implica una operación de conformado en frío para obtener un nivel de resistencia mecánica más elevado [59]. El objeto y campo de aplicación de esta norma consiste en especificar las condiciones técnicas y de suministro de chapas y bandas laminadas en caliente o en frío de aceros inoxidables resistentes a la corrosión para usos generales, además de cumplir con las condiciones técnicas de suministro generales especificadas en la norma EN 10021 [57]

En esta norma, los requisitos de las propiedades mecánicas de los tipos de acero con acabado 2H se proporcionan de forma independiente, es decir, se muestran por un lado el rango de valores de resistencia mecánica y por otro el rango de valores de límite elástico, sin establecer una relación directa entre ambos valores. Estas propiedades se muestran en las tablas 17 (tabla 5.2) y 18 (tabla 5.3) de dicha norma.

<b>Símbolo</b>	<b>Límite elástico convencional al 0,2% <sup>a, b</sup> MPa*</b>
+C700	700 a 850
+C850	850 a 1 000
+C1000	1 000 a 1 150
+C1150	1 150 a 1 300
+C1300	1 300 a 1 500

*Tabla 5.2.- Niveles de resistencia a la tracción en estado de conformado en frío (ruta de proceso 2H) según la UNE-EN 10088-2 (Tabla 17) [59]*

<b>Símbolo</b>	<b>Límite elástico convencional al 0,2% <sup>a, b</sup> MPa*</b>
+CP350	350 a 500
+CP500	500 a 700
+CP700	700 a 900
+CP900	900 a 1 100
+CP1100	1 100 a 1 300

*Tabla 5.3.- Niveles del límite elástico convencional al 0.2% en estado de conformado en frío (ruta de proceso 2H) según la UNE-EN 10088-2 (Tabla 18) [59]*

Por otro lado, cabe destacar las especificaciones contempladas en la norma UNE-EN 1993-1-4 de reglas generales para el diseño estructural de acero inoxidable en producto plano, cuyo Anexo B proporciona información sobre el acero inoxidable en la condición de endurecido mecánico por trabajado en frío, por el proceso de fabricación de elementos estructurales, o una combinación de ambos. [49]

Las reglas incluidas en el Anexo B son aplicables solamente si se mantiene las propiedades durante la fabricación y ejecución de la estructura, y durante la vida útil de la misma. La norma indica que no deberían realizarse procesos de soldadura o tratamientos térmicos de los productos a menos que pueda demostrarse mediante ensayos el correcto comportamiento. [49]

En el caso de los aceros endurecidos por deformación en frío, la norma UNE-EN 1993-1-4 se basa en las especificaciones de la UNE-EN 10088-2 (tabla 5.4). El valor de resistencia a la tracción mostrado en la norma UNE-EN 10088-2 puede considerarse como el valor UTS (*Ultimate Tensile Strength*) o de resistencia última a la tracción. En cuanto al límite elástico, puede considerarse el indicado en la norma UNE-EN 10088-2 como valor de resistencia característica siempre que esté garantizado por el fabricante. [49] Por otro lado, esta norma indica que cualquier acero es apto a la soldadura si mantiene sus prestaciones.

Grado de acero inoxidable	Límite elástico convencional correspondiente al 0,2% en la condición de trabajado en frío	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	Resistencia a tracción en la condición de trabajado en frío	$f_u$ N/mm <sup>2</sup>
Aceros austeníticos	CP350	350	C700	700
	CP500	500	C850	850
	CP700	700	C1000	1000

Tabla 5.4.- Valores nominales del límite elástico y de la resistencia última a tracción para aceros estructurales trabajados en frío según la norma UNE-EN 1993-1-4 [49]

Otro criterio que deben cumplir los aceros de uso estructural es el de **ductilidad mínima**, según la norma UNE-EN 1993-1-1 [48] en el punto 3.2.2, en términos de límites de:

- Coeficiente  $f_u/f_y$ , donde  $f_u$  es la resistencia última a la tracción mínima ( $R_m$ ) y  $f_y$  es el límite elástico ( $R_{p0,2\%}$ ).

- Deformación remanente concentrada de rotura de una base medida de longitud  $5,65\sqrt{A_0}$  (donde  $A_0$  es el área de la sección transversal inicial).
- Deformación última  $\epsilon_u$ , donde  $\epsilon_u$  corresponde a la resistencia última de tracción  $f_u$ .

Al igual que la norma UNE-EN 1993-1-4, la parte 1-1 también se basa en la norma UNE-EN 10088-2 para el cumplimiento de las exigencias mecánicas de los materiales.

Los **valores límites recomendados** para el cumplimiento de los tres criterios de ductilidad establecidos son:

- $f_u/f_y \geq 1,10$
- la deformación remanente concentrada de rotura no inferior al 15%
- $\epsilon_u \geq 15 \epsilon_y$ , donde  $\epsilon_y$  es la deformación correspondiente al límite elástico y se expresa:  $\epsilon_y = \frac{f_y}{E}$ , donde E es el módulo elástico longitudinal.

### 5.1.2. Análisis de los resultados para el cumplimiento de los objetivos del Eurocódigo.

La norma de diseño estructural que tiende a implantarse a nivel europeo es la UNE-EN 1993 o Eurocódigo 3. Hasta la fecha, en España existen diversas normas que recogen los criterios de uso estructural, que llegan a resultar en algunas ocasiones ambiguas y a veces contradictorias.

Es por ello, que especialistas de diversos campos tecnológicos, como ingenieros, arquitectos, etc; están realizando una revisión exhaustiva de la normativa vigente para unificar los criterios de diseño estructural y requisitos de los materiales bajo una única norma. El Eurocódigo 3 deberá satisfacer necesidades de cualquier índole, desde el punto de vista de la seguridad estructural hasta criterios de ductilidad y de exigencias de propiedades mecánicas, de forma que **cualquier diseñador disponga de toda la información en una sola referencia.**

Esta actividad se desarrolla en un grupo de evolución del eurocódigo 3 al que pertenece Acerinox Europa S.A.U. y participa de forma activa. Esta empresa está aportará los datos necesarios para el conocimiento de las prestaciones mecánicas y comportamiento de los aceros inoxidables en estado de suministro.

Dentro de este marco, existe una línea de investigación dedicada al desarrollo de los acabados endurecidos por deformación en frío, los resultados obtenidos son:

1. A partir de los datos disponibles en la base de datos de Acerinox Europa S.A.U. (punto 4.1.1), se establece la relación directa entre los valores de límite elástico al 0,2% y de la resistencia a la tracción. Los resultados se muestran en las tablas 5.5 y 5.6, donde además se incorporan los rangos de alargamiento y dureza dada la disponibilidad de dichos datos.

En la tabla 5.5 se muestran los rangos mínimos y máximos de las propiedades  $R_{p0,2\%}$ , A y dureza en función de los rangos C de resistencia a la tracción proporcionados en la UNE-EN 10088-2.

Rm (MPa) según UNE-EN 10088-2		Nº Casos	Rp <sub>0.2</sub> (MPa)		A (%)		Dureza (HV)	
			MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
C700	<b>700-850</b>	85	625	720	16,93	31,88	251	325
C850	<b>850-1000</b>	614	621	882	9,2	28,37	241	355
C1000	<b>1000-1150</b>	176	732	985	4,69	19,72	300	391
C1150	<b>1150-1300</b>	22	936	1034	5,44	9,85	295	407

*Tabla 5.5.- Relación de las propiedades mecánicas básicas para los distintos rangos de Rm.*

De forma similar, en la tabla 5.6 se establecen los valores mínimos y máximos según el rango CP de límite elástico indicados en la norma UNE-EN 10088-2, para las propiedades Rm, A y dureza.

Rp <sub>0,2</sub> (MPa) según UNE-EN 10088-2		Nº Casos	Rm (MPa)		A (%)		Dureza (HV)	
			MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
CP700	700-850	85	775	965	20,93	31,88	241	325
CP850	850-1000	614	1055	1243	4,69	14,6	295	407
CP1000	1000-1150	176	833	1134	7,51	28,05	273	391

Tabla 5.6.- Relación de las propiedades mecánicas básicas para los distintos rangos de Rp<sub>0,2%</sub>

2. Para asegurar que los materiales cumplen con el **criterio de ductilidad mínima**, se ha aplicado los tres criterios mínimos establecidos por la UNE-EN 1993-1-1 a los materiales acopiados con distintos grados de endurecimiento, espesor y tipo de acero descritos en el punto 4.1.2. Los resultados se muestran en la tabla 5.7.

ID	Espesor (mm)	Grado endur.	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Mód Elast (MPa)	f <sub>u</sub> /f <sub>y</sub>	ε <sub>y</sub> =f <sub>y</sub> /E	15·ε <sub>y</sub>
1.4301 (v1)									
1A	1,5	¼	928	787	21,06	191.058	1,18	0,0041	0,0615
1B			968	811	11,51	230.231	1,19	0,0035	0,0525
1C			915	776	22,08	202.410	1,18	0,0038	0,057
1D			890	735	23,5	184.727	1,21	0,0040	0,06
1E			976	800	19,26	202.335	1,22	0,0040	0,06
2A	1,7		905	762	23,99	217.808	1,19	0,0035	0,0525
2B			914	775	20,67	201.993	1,18	0,0038	0,057
2C			907	772	19,27	185.045	1,17	0,0042	0,063
2D			925	775	22,23	191.510	1,19	0,0040	0,06
2E			911	747	25,61	185.441	1,22	0,0040	0,06
2F			933	798	20,3	210.273	1,17	0,0038	0,057
2G			919	768	24,84	195.547	1,20	0,0039	0,0585
2H			927	798	21,99	188.295	1,16	0,0042	0,063
2I			941	752	22,89	177.987	1,25	0,0042	0,063
3A	2		937	769	22,88	197.201	1,22	0,0039	0,0585
3B			966	800	15,7	196.188	1,21	0,0041	0,0615
3C			980	818	18,1	187.828	1,20	0,0044	0,066
3D			997	849	13,32	197.243	1,17	0,0043	0,0645
3E			956	814	17,02	217.184	1,17	0,0037	0,0555

ID	Espesor (mm)	Grado endur.	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Mód Elast (MPa)	f <sub>u</sub> /f <sub>y</sub>	ε <sub>y</sub> =f <sub>y</sub> /E	15·ε <sub>y</sub>
1.4301 (v1)									
3F			950	787	18,81	233.532	1,21	0,0034	0,051
3G			936	802	15,67	199.575	1,17	0,0040	0,06
3H			966	820	18,59	179.848	1,18	0,0046	0,069
3I			940	781	20,55	197.201	1,20	0,0040	0,06
4A	2,3		978	822	20,63	181.354	1,19	0,0045	0,0675
4B			1030	803	20,06	188.314	1,28	0,0043	0,0645
4C			970	822	18,57	217.749	1,18	0,0038	0,057
10A	0,6	½	1188	957	7,84	224.065	1,24	0,0043	0,0645
10B			1136	941	7,57	197.802	1,21	0,0048	0,072
11A	0,7		1042	848	14,6	197.839	1,23	0,0043	0,0645
11B			984	825	16,34	207.089	1,19	0,0040	0,06
12A	2,4		944	826	16,88	193.508	1,14	0,0043	0,0645
12B			992	860	13,2	203.659	1,15	0,0042	0,063
13A	0,75	¾	1169	962	6,87	206.902	1,22	0,0046	0,066
13B			1239	1022	6,17	216.732	1,21	0,0047	0,0705
EN 1.4301 (v2)									
5	1,5	¼	928	753	22,09	205.331	1,23	0,0037	0,0555
6	2		939	813	13,24	197.974	1,15	0,0041	0,0615
7	2,3		923	780	15,75	175.754	1,18	0,0044	0,066
8	2,7		941	826	19,05	189.927	1,14	0,0043	0,0645
EN 1.4310									
9A	2,3	¼	908	734	28,07	168.820	1,24	0,0043	0,0645
9B			884	732	31,89	194.121	1,21	0,0038	0,057
9C			927	690	30,96	202.335	1,34	0,0034	0,051

Tabla 5.7.- Resultados de la aplicación de los tres criterios de ductilidad.

A partir de la tabla 5.7 se observa que todos los materiales seleccionados de los distintos tipos de acero y grados de endurecimiento, cumplen con el **primer criterio de ductilidad** ( $f_u/f_y > 1,1$ ).

En cuanto al **segundo criterio**, existen algunos casos en los que el alargamiento es inferior al 15% (marcados en azul en la tabla 5.7). La mayoría de estos casos pertenecen al grado de endurecimiento ½ y ¾ duro, donde se observa que a



elevados valores de límite elástico y de resistencia a la tracción, el alargamiento del material disminuye drásticamente. En cuanto al espesor, tal como se observa en la figura 5.1 en la mayoría de los casos, a medida que éste disminuye, el alargamiento también lo hace. Esto puede deberse a que para conseguir espesores menores, la reducción aplicada en su proceso de fabricación es mayor, endureciéndose más el material debido a las deformaciones mecánicas provocadas en la laminación.

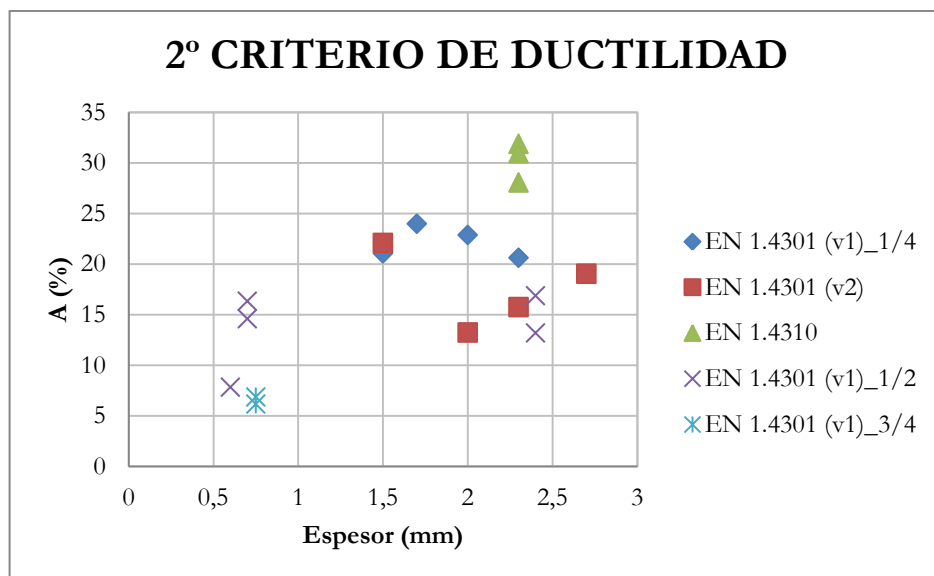


Figura 5.1.- Análisis de la relación entre el alargamiento y el espesor de los materiales

El **tercer valor límite de ductilidad** también lo cumplen todos los materiales.

3. Anisotropía: Variación del límite elástico y de la resistencia a la tracción según la dirección respecto al sentido de laminación.

En las figuras 5.2 y 5.3 se observa que a medida que el material se endurece por deformación en frío se produce una diferencia cada vez más acentuada de los límites elásticos y de resistencias a la tracción entre la dirección longitudinal y transversal, por lo que si el valor mínimo del rango en la dirección transversal en la norma es por ejemplo 500 MPa, no se pueden permitir valores inferiores en la

dirección longitudinal. El Eurocódigo exige asegurar un valor mínimo de resistencia a 90° que no sea mucho menor que a 0°.

Para el estudio de la influencia de la dirección respecto al sentido de laminación de la probeta, se relacionan los valores del límite elástico (figura 5.2) y de la resistencia a la tracción (figura 5.3) obtenidos tras el ensayo de tracción a temperatura ambiente de los materiales acopiados para este TFC en la dirección longitudinal y transversal, de los distintos tipos de acero.

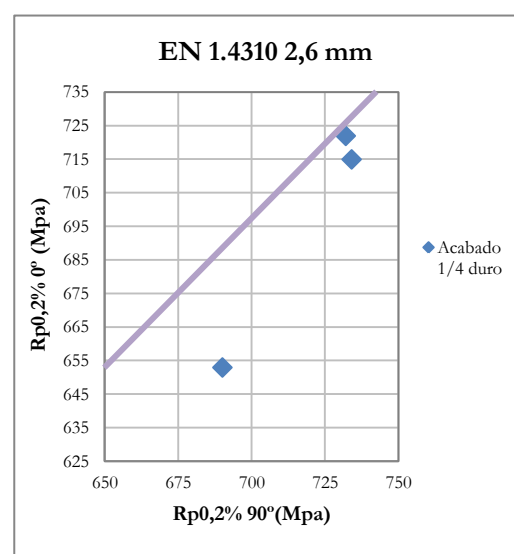
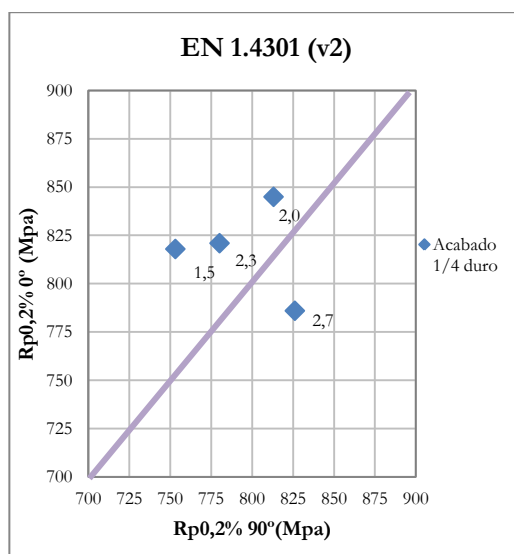
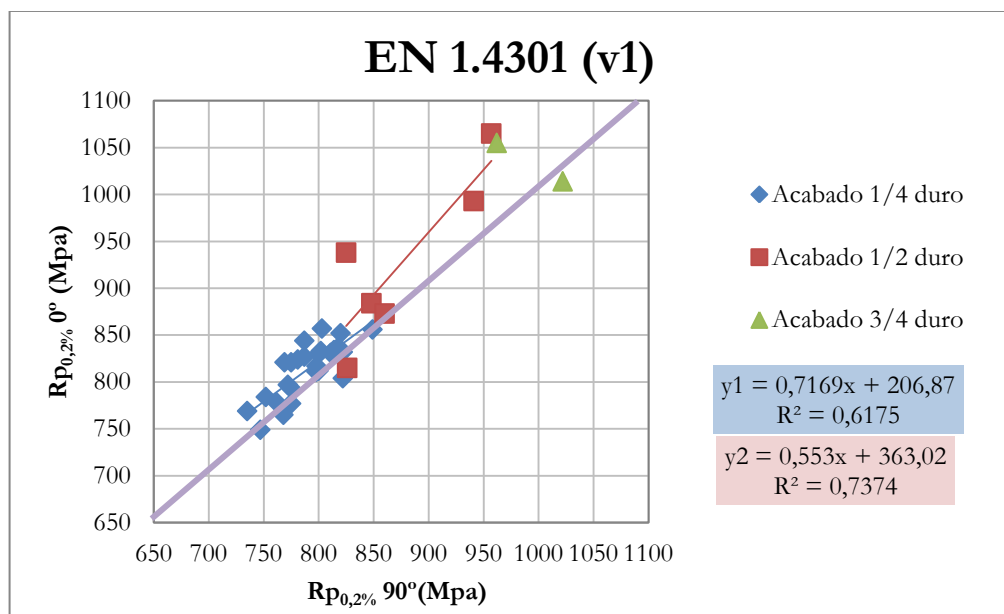


Figura 5.2.- Anisotropía de los valores del límite elástico de las muestras en estudio

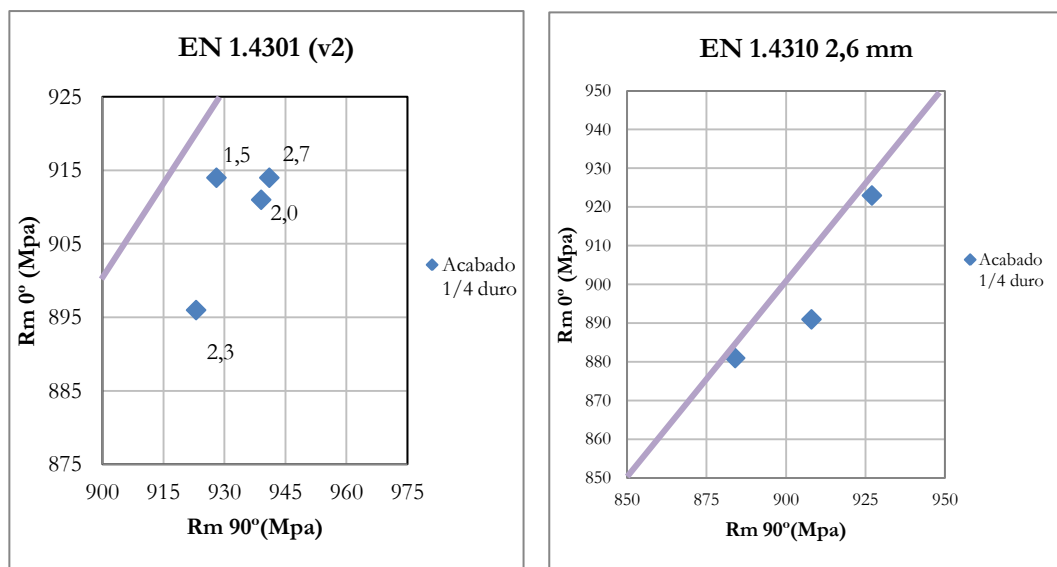
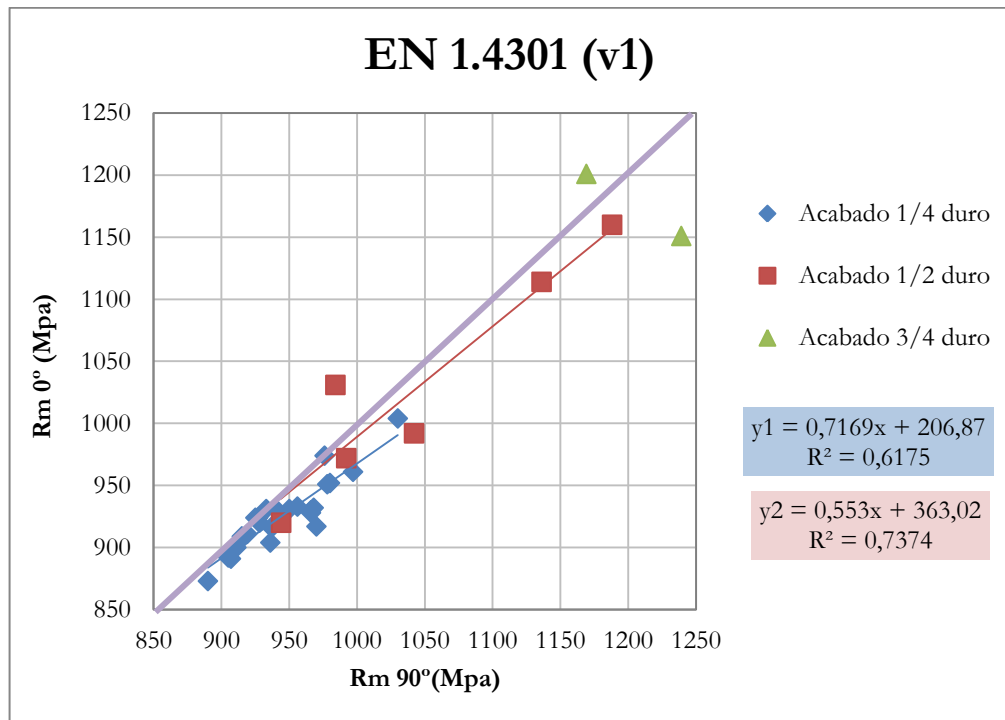


Figura 5.3.- Anisotropía de los valores de la resistencia a la tracción de las muestras en estudio

- **Análisis de los resultados de la evaluación del límite elástico:**

En la figura 5.2 se observa que el tipo de acero **EN 1.4301 (v1)** para un acabado  $\frac{1}{4}$ , el límite elástico correspondiente a la dirección longitudinal es ligeramente superior al transversal y para el acabado  $\frac{1}{2}$  tiende a ser superior. Sin embargo

para el caso del acabado  $\frac{3}{4}$  duro no es posible establecer una tendencia debido a la escasa población de este tipo de acero y acabado.

En el caso del tipo de acero **EN 1.4301 (v2)**  $\frac{1}{4}$  duro, la mayoría de los casos presenta un límite elástico superior en la dirección longitudinal que en la transversal a excepción del espesor 2,7mm.

Por último, para el tipo de acero **EN 1.4310**  $\frac{1}{4}$  duro y espesor 2,6mm no puede establecerse una tendencia debido al escaso número de muestras.

- **Análisis de los resultados de la evaluación de la resistencia a la tracción:**

El tipo de acero **EN 1.4301 (v1)** tanto el acabado  $\frac{1}{4}$  duro como el  $\frac{1}{2}$  duro muestran una tendencia equitativa entre los valores de resistencia a la tracción en la dirección longitudinal como transversal. Para el caso de  $\frac{3}{4}$  debido al menor número de muestras no puede establecerse ninguna tendencia.

Para todos los espesores considerados del tipo de acero **EN 1.4301 (v2)**  $\frac{1}{4}$  duro se observa que la resistencia a la tracción en la dirección longitudinal es claramente inferior que en la dirección transversal. Cabe destacar, que esta situación no es desfavorable desde el punto de vista del diseño estructural, ya que el valor UTS no es relevante siempre y cuando se cumplan con los tres criterios de ductilidad mínima.

En el caso del tipo de acero 1.4310  $\frac{1}{4}$  duro y espesor de 2,6mm ocurre algo similar que el caso de los materiales pertenecientes al tipo de acero **EN 1.4301 (v2)**.

#### 4. Comportamiento óptimo del material soldado

En la revisión de la normativa se quiere permitir soldaduras en las que las prestaciones de la unión soldadas sean inferiores al del material de partida, ya que se parte del hecho de que los aceros con acabado endurecido por deformación en frío experimentan una caída de sus prestaciones mecánicas tras la aplicación de un proceso de soldadura [44].

##### **5.1.3. Análisis de los resultados del estudio estadístico de las propiedades mecánicas básicas de los aceros con acabado endurecido por deformación en frío.**

En la tabla 5.8, a partir de los datos de certificación descritos en el punto 4.1.1 se han establecido los valores mínimos, máximos, medios y la desviación típica para el tipo de acero EN 1.4301 (v1) (tipo de acero más habitual en la fabricación de aceros con acabado endurecido por deformación en frío).

De esta forma se estima la relación existente entre las propiedades mecánicas básicas ( $R_m$ ,  $R_{p0,2\%}$ ,  $A$  y  $HV$ ) de los aceros endurecidos por deformación en frío (figura 5.4) y el cumplimiento de las mismas según los rangos establecidos por la norma (tabla 5.1).

Grado endurec.	Espesor (mm)	N° Muestras		Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)
$\frac{1}{4}$	0,4-1,65	262	MÍN	776	625	6	251
			MEDIA	932	771	18	307
			DESV.STD	83,82	72,95	6,36	23,18
			MÁX	1165	971	32	391
	1,7	380	MÍN	788	633	8	258
			MEDIA	941	774	19	309
			DESV.STD	57,46	52,18	4,08	15,78
			MÁX	1176	967	30	364
	1,9-2,8	159	MÍN	822	661	8	273
			MEDIA	947	780	17	310
			DESV. STD	47,84	45,48	4,31	14,75
			MÁX	1108	940	30	355
$\frac{1}{2}$	0,4-0,7	39	MÍN	919	760	5	298
			MEDIA	1107	917	8	346
			DESV. STD	72,40	64,34	2,27	21,51
			MÁX	1243	1029	14	397
	2	48	MÍN	943	777	10	300
			MEDIA	1004	835	14	322
			DESV. STD	29,67	29,66	2,49	8,46
			MÁX	1060	898	20	335
$\frac{3}{4}$	0,75	10	MÍN	843	700	6	284
			MEDIA	1122	938	11	336
			DESV. STD	147,66	117,07	7,87	30,83
			MÁX	1243	1034	28	371

*Tabla 5.8.- Estadística de las propiedades mecánicas básicas del acero EN 1.4301 con distintos grados de deformación en frío.*

Los resultados de la tabla 5.8 muestran que el caso del acabado  $\frac{1}{4}$  duro, todos los rangos de espesores cumplen con las exigencias de la norma ASTM 666.

Para el caso de los materiales estudiados con acabado  $\frac{1}{2}$  duro, se observa que los materiales con espesores 0,4 – 0,7 mm no cumplen con las restricciones del límite elástico ni de resistencia a la tracción, sin embargo los materiales de 2 mm de espesor solo cumplen con los requisitos mínimos exigidos en cuanto al límite elástico.

Por último, cabe destacar que la norma no incluye el tipo de acero EN 1.4301 (v1) o AISI 304 para el acabado  $\frac{3}{4}$ .

En la figura 5.4 se muestran las relaciones entre las propiedades mecánicas a partir de los resultados obtenidos según el grado de endurecimiento. Los gráficos de la izquierda muestran la relación entre el límite elástico y la resistencia a la tracción; y mediante los de la derecha se estima la influencia de los valores de resistencia a la tracción elevados característicos de este tipos de acero, en el grado de dureza que el material adquiere, donde se observa que a medida que se incrementa la resistencia a la tracción el material se endurece.

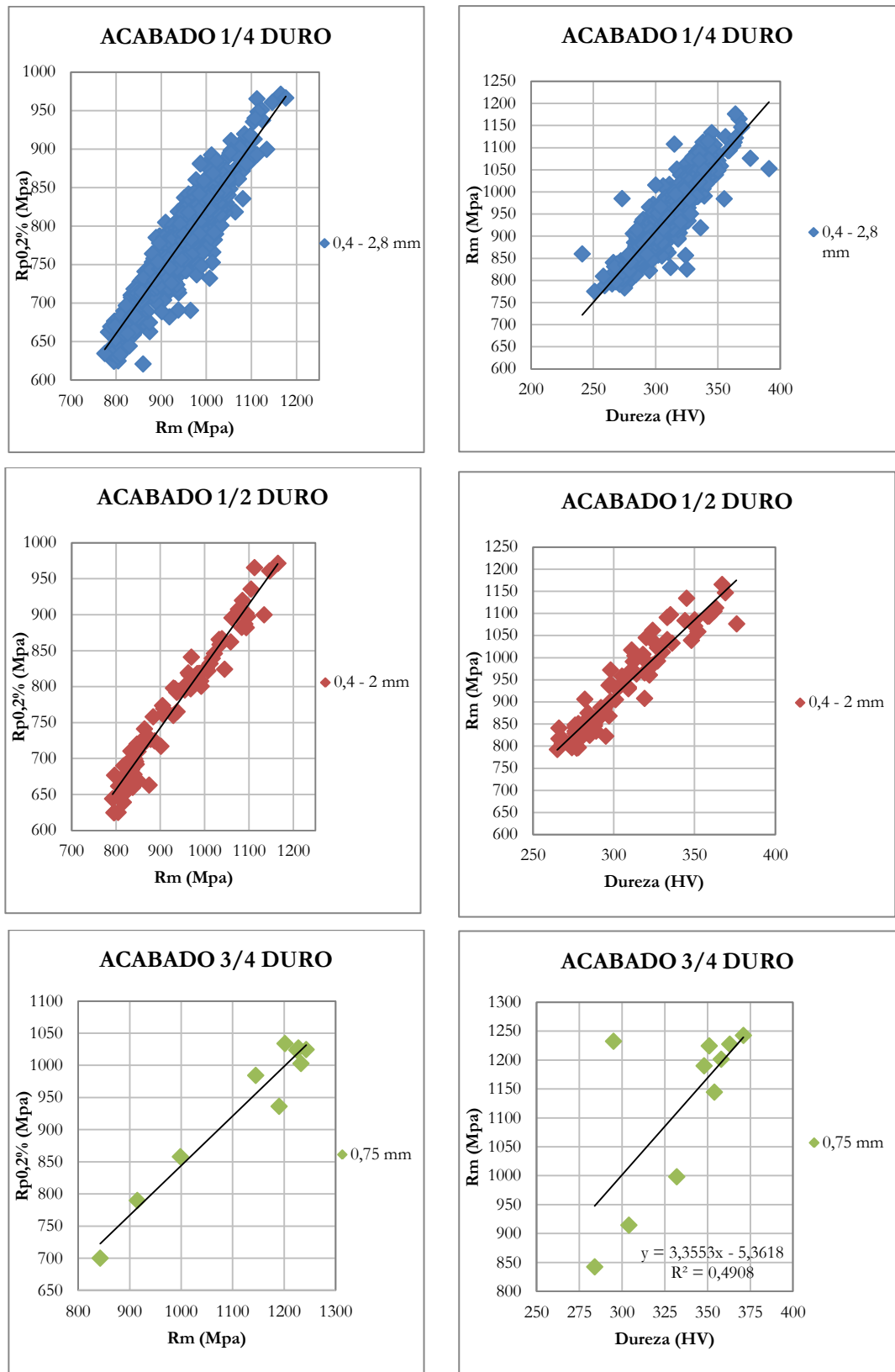


Figura 5.4.- Relaciones de las propiedades mecánicas básicas:  $R_{p0,2\%}$ - $R_m$  (izda) y  $R_m$ -HV (dcha) del estudio estadístico



## **5.2. Resultados de la caracterización completa experimental**

### **5.2.1. Resultados del análisis de la composición química**

En primer lugar se ha analizado la composición química mediante el espectrómetro de fluorescencia de rayos-X y los dos equipos determinadores de C, S y N tal como se describe en el capítulo anterior.

En el Anexo I se muestran todos los resultados obtenidos del análisis de la composición química de los distintos materiales.

De este modo se ha verificado que todos los materiales seleccionados cumplen con los rangos de composición química exigidos por la norma EN 10088-2 [59]. Además, mediante el análisis de la composición química se han calculado las temperaturas  $M_s$  y  $M_{d30}$  que permiten evaluar la estabilidad de la austenita, mostrados más adelante.

### **5.2.2. Evaluación de la influencia del programa de reducción del proceso de fabricación de los acabados endurecidos por deformación en frío**

En la figura 2.13 se muestra el proceso de fabricación de los aceros endurecidos por deformación en frío, en el que se observa las diferentes etapas de laminación. Como ya se ha comentado anteriormente, el grado de reducción tienen una gran influencia en estos materiales, ya que sus propiedades mecánicas dependen del grado de deformación aplicado durante la etapa de la segunda laminación en frío. Por ello, a continuación se evalúa la influencia del proceso de fabricación de estos aceros.

En la tabla 5.8, se muestran los espesores de partida tras la laminación caliente y los espesores intermedios, es decir, los de la primera laminación en frío, así como las distintas reducciones aplicadas hasta conseguir el espesor final requerido.

ID			ESP LC	RED 1ºLF	ESP 1ºLF	RED 2ºLF	ESP 2ºLF	RED ACUM
1	1.4301 (v1)	¼	5	62,00	1,9	21,05	1,5	70,00
2			5	58,00	2,1	19,05	1,7	66,00
3			5	48,00	2,6	23,08	2	60,00
4			6	50,00	3	23,33	2,3	61,67
5	1.4301 (v2)		5	62,00	1,9	21,05	1,5	70,00
6			5	48,00	2,6	23,08	2	60,00
7			6	50,00	3	23,33	2,3	61,67
8			6	45,00	3,3	18,18	2,7	55,00
9	1.4310		5	40,00	3	13,33	2,6	48,00
10	1.4301 (v1)	½	4	77,50	0,9	33,33	0,6	85,00
11			4	77,50	0,9	22,22	0,7	82,50
12			6	46,67	3,2	25,00	2,4	60,00
13		¾	4,5	73,33	1,2	37,50	0,75	83,33

Tabla 5.9.- Condiciones de fabricación de los aceros endurecidos seleccionados

A partir de la tabla 5.9 se observa que el programa de reducción se realiza en función del espesor final requerido y del grado de endurecimiento, no del tipo de acero.

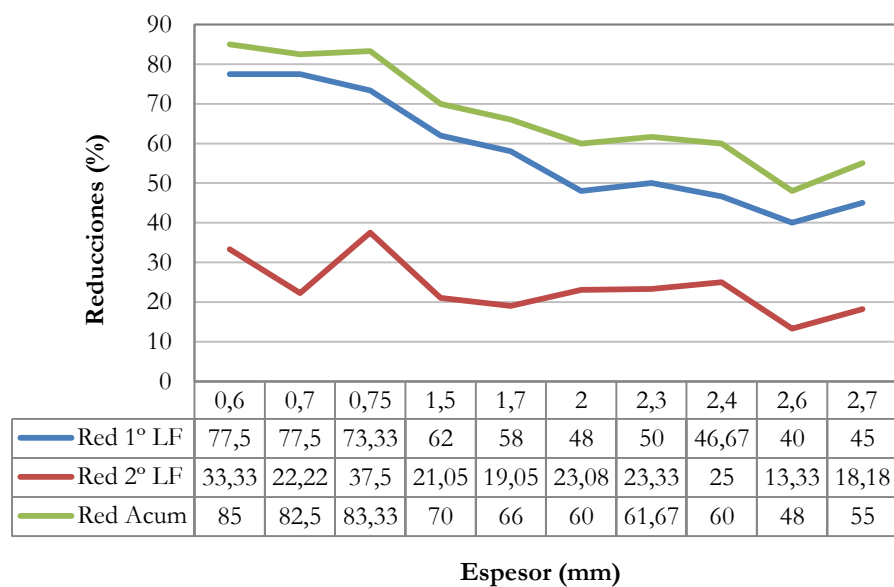


Figura 5.5.- Evaluación de la relación del porcentaje de reducción en cada etapa de laminación con el espesor requerido.

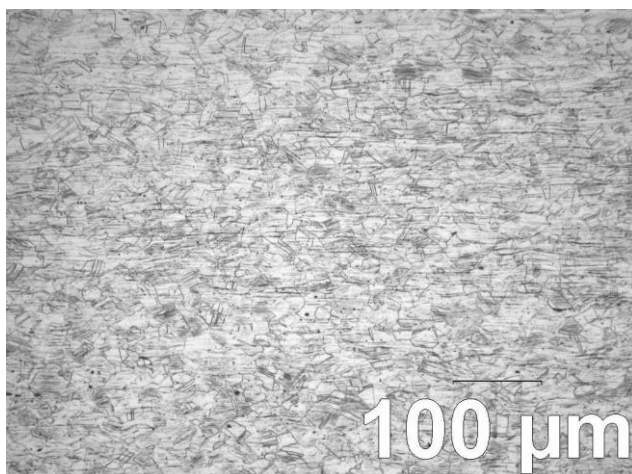
En la figura 5.5 se observa que para la fabricación de los espesores más finos, el material experimenta una reducción acumulada más acentuada que el caso de los espesores más gruesos. Ya que el aumento del grado de endurecimiento se consigue a partir de la deformación provocada por el trabajo en frío, el programa de reducción de la 2ª laminación en frío será mayor para los acabados  $\frac{3}{4}$  duro.

En cuanto a la influencia de la reducción en las características estructurales y mecánicas, se evaluará en los puntos siguientes de este capítulo.

### 5.2.3. Resultados del análisis microestructural

Dada la gran cantidad de microestructuras analizadas a partir de las 41 muestras seleccionadas recogidas en la tabla 4.3 del capítulo de materiales y métodos, a continuación se muestra una fotomicrografía representativa de cada tipo de material y grado de endurecimiento (figuras 5.6-5.10).

En el Anexo II se incluyen todas las microestructuras analizadas.



*Figura 5.6.- Microestructura del tipo EN 1.4301 (v1)  $\frac{1}{4}$  duro*

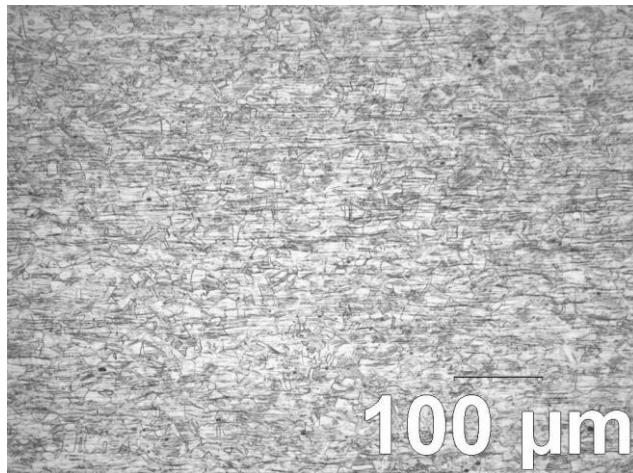


Figura 5.7.- Microestructura del tipo EN 1.4301 (v2) 1/4 duro

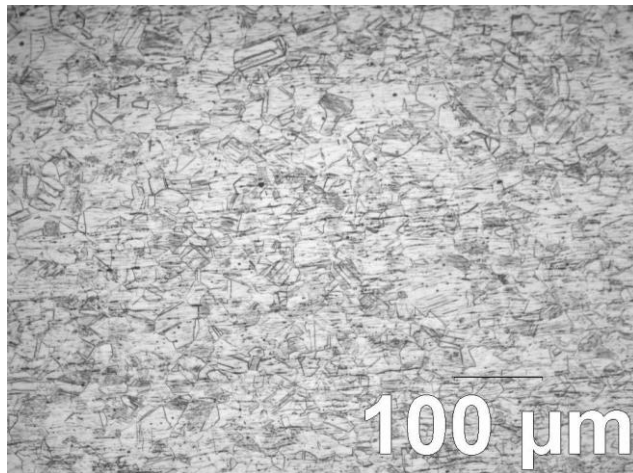


Figura 5.8.- Microestructura 1.4310 1/4 duro de deformación

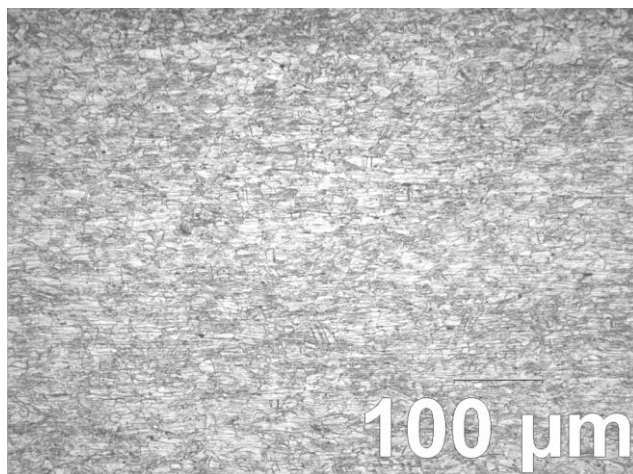
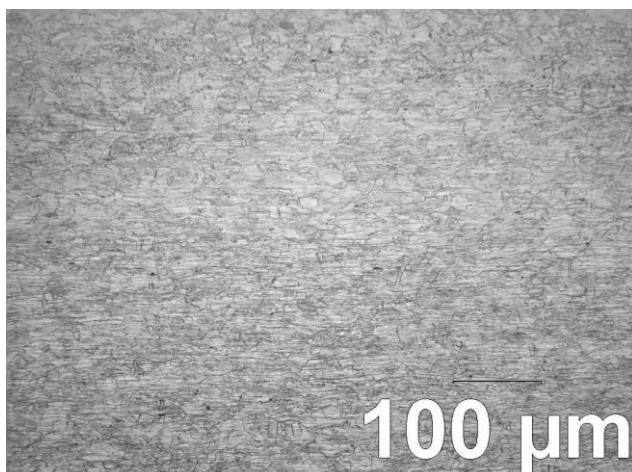


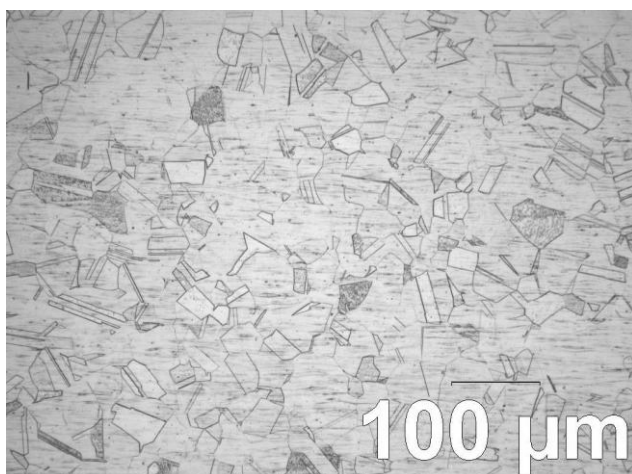
Figura 5.9.- Microestructura del tipo EN 1.4301 (v1) 1/2 duro



*Figura 5.10.- Microestructura del tipo EN 1.4301 (v1) espesor 0,75mm y  $\frac{3}{4}$  duro*

Estas fotomicrografías muestran estructuras más distorsionadas a medida que la reducción de la 2ª laminación en frío aplicada aumenta. Se aprecian zonas con algunas bandas de deslizamiento y agujas de martensita, los granos son alargados y están distribuidos de forma heterogénea.

Con objeto de aclarar la influencia del grado de deformación, se incluye una estructura en estado de recocido habitual (figura 5.11), donde se observa unos granos equiaxiales con una distribución homogénea.



*Figura 5.11.- Microestructura 1.4301 (v1) en estado de recocido*

En cuanto al tipo de acero, las dos versiones de EN 1.4301 presentan estructuras deformadas muy similares entre sí. En cuanto al EN 1.4310, el menor contenido de níquel no se traduce en un cambio observable en la microestructura resultante respecto a las dos versiones de EN 1.4301.

#### **5.2.4. Resultados de la medida del tamaño de grano, de la estabilidad de la austenita y del magnetismo**

Gran parte del endurecimiento de este tipo de acero se debe a la transformación de la austenita en martensita durante su proceso de fabricación ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ). La fuerza impulsora de los complejos mecanismos de transformación martensítica se debe a la diferencia de temperaturas de la formación de la austenita y de la martensita, que a su vez depende de la estabilidad de la austenita.

Para caracterizar la estabilidad de la austenita teóricamente se utilizan dos criterios: las temperaturas  $M_s$  (ec 2.1) y  $M_{d30}$  (ec 2.3). La  $M_{d30}$  incorpora en su fórmula el valor del tamaño de grano (GS), donde a mayor GS menor  $M_{d30}$ . En las tablas siguientes (5.9 – 5.11) se muestran los resultados de la medida del tamaño de grano, de la temperatura  $M_s$  y  $M_{d30}$ .

A nivel experimental, se puede estimar el grado de endurecimiento de este tipo de acero a través de la medida del contenido magnético de las muestras estudiadas. Esto es posible debido a dos aspectos fundamentales. En primer lugar, por el carácter magnético de la martensita y en segundo lugar, por la cantidad de martensita formada durante la segunda laminación del proceso de fabricación de los acabados endurecidos por deformación.

Para la medida experimental del magnetismo, se ha recurrido al empleo de un ferritoscopio Fisheroscope MMS. Dada la configuración de este equipo, se puede estimar el contenido de la fase magnética (martensita) de forma aproximada aunque no su contenido real. El magnetismo se ha medido en todos los materiales acopiados

para establecer una comparación entre ellos e intentar correlacionar el grado de deformación y el magnetismo. Los resultados se muestran en las tablas 5.10 – 5.12.

**a) Grado de endurecimiento ¼ duro**

ID	Espesor (mm)	Reducción 2º LF (%)	GS	M <sub>s</sub> (°C)	M <sub>d30</sub> (°C)	MAGNETISMO	
						Valor	Media
1.4301 (v1)							
1A	1,5	21,05	8,6	-151,5	-4,8	1,085	1,065
1B			8,9	-172,9	-9,0	1,053	
1C			7,8	-172,9	-7,4	0,817	
1D			8,7	-172,9	-8,7	0,469	
1E			8,5	-170,4	-8,5	1,902	
2A	1,7	19,05	9,1	-151,5	-5,5	0,617	0,969
2B			9,1	-151,5	-5,5	0,728	
2C			8,6	-151,5	-4,8	0,478	
2D			8,0	-160,9	-3,8	0,715	
2E			8,8	-121,8	5,3	1,683	
2F			9,4	-175,4	-10,1	0,934	
2G			11,0	-160,0	-12,8	0,688	
2H			9,4	-160,0	-10,6	0,51	
2I			8,3	-148,5	7,7	2,364	
3A	2,0	23,08	7,8	-130,1	3,5	2,057	1,280
3B			7,8	-157,9	-5,0	1,545	
3C			8,6	-175,4	-9,0	1,376	
3D			8,7	-182,4	-11,1	1,025	
3E			8,4	-172,9	-8,3	0,972	
3F			9,2	-175,4	-9,8	0,906	
3G			8,4	-137,9	0,2	0,834	
3H			8,3	-137,9	0,3	1,492	
3I			7,7	-151,8	-4,7	1,314	
4A	2,3	23,33	8,2	-121,8	6,1	4,029	4,859
4B			8,0	-144,5	9,5	7,247	
4C			7,9	-144,5	9,7	3,302	

ID	Espesor (mm)	Reducción 2º LF (%)	GS	M <sub>s</sub> (°C)	M <sub>d30</sub> (°C)	MAGNETISMO	
						Valor	Media
1.4301 (v2)							
5	1,5	21,05	7,5	-139,0	-4,4	2,628	
6	2	23,08	9,2	-130,9	-6,9	2,123	
7	2,3	23,33	8,9	-124,7	-4,5	1,211	
8	2,7	18,18	9,9	-159,2	-9,0	1,626	
1.4310							
9A	2,6	13,33	8,2	-150,5	5,4	1,182	1,275
9B			7,5	-161,9	7,0	0,101	
9C			8,4	-130,6	15,9	2,543	

Tabla 5.10.-GS, estabilidad de la austenita y magnetismo de los materiales 1/4 duro

## b) Grado de endurecimiento 1/2 duro

1.4301 (v1)							
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	GS	M <sub>s</sub> (°C)	M <sub>d30</sub> (°C)	MAGNETISMO	
						Valor	Media
10A	0,6	33,33	8,5	-152,8	6,2	5,075	3,301
10B			8,5	-163,6	-10,8	1,526	
11A	0,7	22,22	9,0	-184,8	-13,4	2,418	1,793
11B			9,0	-156,8	-2,3	1,167	
12A	2,4	25,0	9,6	-145,0	-2,5	0,995	1,875
12B			9,1	-145,0	-1,8	2,754	

Tabla 5.11.- GS, estabilidad de la austenita y magnetismo de los materiales 1/2 duro

## c) Grado de endurecimiento 3/4 duro

1.4301 (v1)							
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	GS	M <sub>s</sub> (°C)	M <sub>d30</sub> (°C)	MAGNETISMO	
						Valor	Media
13A	0,75	37,50	8,8	-156,3	-8,4	3,971	3,392
13B			11,0	-148,6	-12,1	2,813	

Tabla 5.12.- GS, estabilidad de la austenita y magnetismo de los materiales 3/4 duro



#### d) Relaciones para la evaluación del grado de magnetismo

Dentro de los complejos mecanismos de transformación martensítica, el punto  $M_{d30}$  indica a partir de la composición química la estabilidad de la austenita. A menor  $M_{d30}$  más estable es la austenita, por lo que genera menos martensita y por consiguiente menos grado de magnetismo.

Por ello, tras observar los valores calculados de  $M_{d30}$  cabe destacar que no existe una diferencia significativa entre los distintos aceros, aun difiriendo entre ellos en cuanto al grado de aleación (contenido en C y Ni). Dado que los valores  $M_{d30}$  son bastante bajos, la austenita de los aceros estudiados es bastante estable.

Mediante las operaciones de deformación en frío, la austenita se transforma en martensita mediante unos mecanismos de deslizamiento o maclado, proporcionando de este modo un cierto nivel de magnetismo al material. En la figura 5.12 se representan los resultados obtenidos tras la medida del magnetismo con la reducción de la 2ª laminación en frío aplicada en los materiales acopiados para evaluar la influencia de los distintos grados de endurecimiento en dicha propiedad.

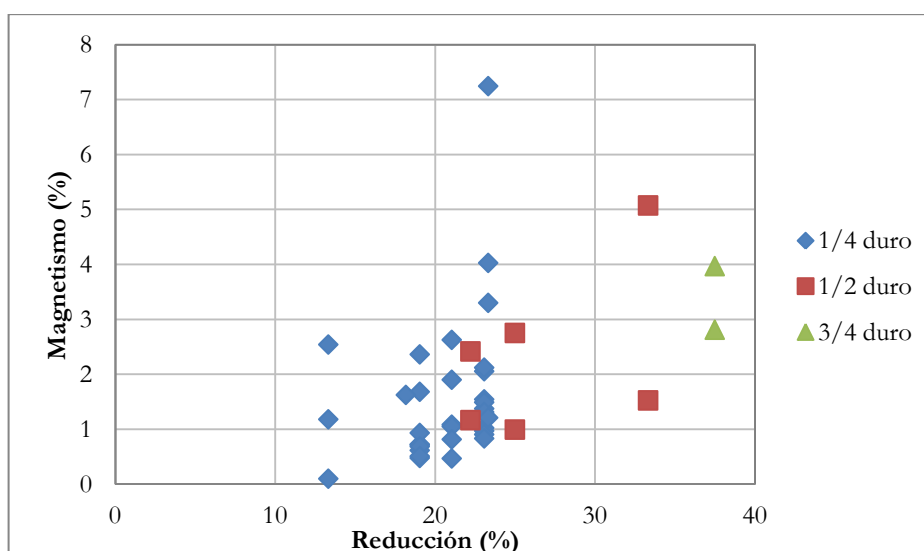


Figura 5.12.- Influencia del grado de endurecimiento (reducción 2ª LF) en el grado de magnetismo.

A partir de la figura 5.12 se observa una clara tendencia, donde a mayor grado de deformación ( $\frac{1}{4} < \frac{1}{2} < \frac{3}{4}$ ) mayor grado de magnetismo. Esto supone una gran ventaja, dado que a partir de la medida del magnetismo puede estimarse las propiedades mecánicas que esa reducción proporciona al material.

Esto es posible gracias a la relación que se muestra a continuación en el punto 5.2.5 de este capítulo en las figuras 5.15 – 5.18, donde se cuantifica el aumento de las propiedades mecánicas en función del grado de deformación ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  duro) para los distintos tipos de acero y espesores.

Por ejemplo, puede observarse que si se aplica una reducción en torno a un 21% en la segunda laminación para obtener un espesor final de 1,5 mm para un acabado  $\frac{1}{4}$  duro se genera entre un 0,5-3% de magnetismo a causa de la transformación de la austenita en martensita generada por la deformación en frío, proporcionando al material unas propiedades mecánicas de 950 MPa de resistencia a la tracción, 800 MPa de límite elástico, aproximadamente un 20% de alargamiento y una dureza de 300 HV (valores obtenidos a partir de la figura 5.16)

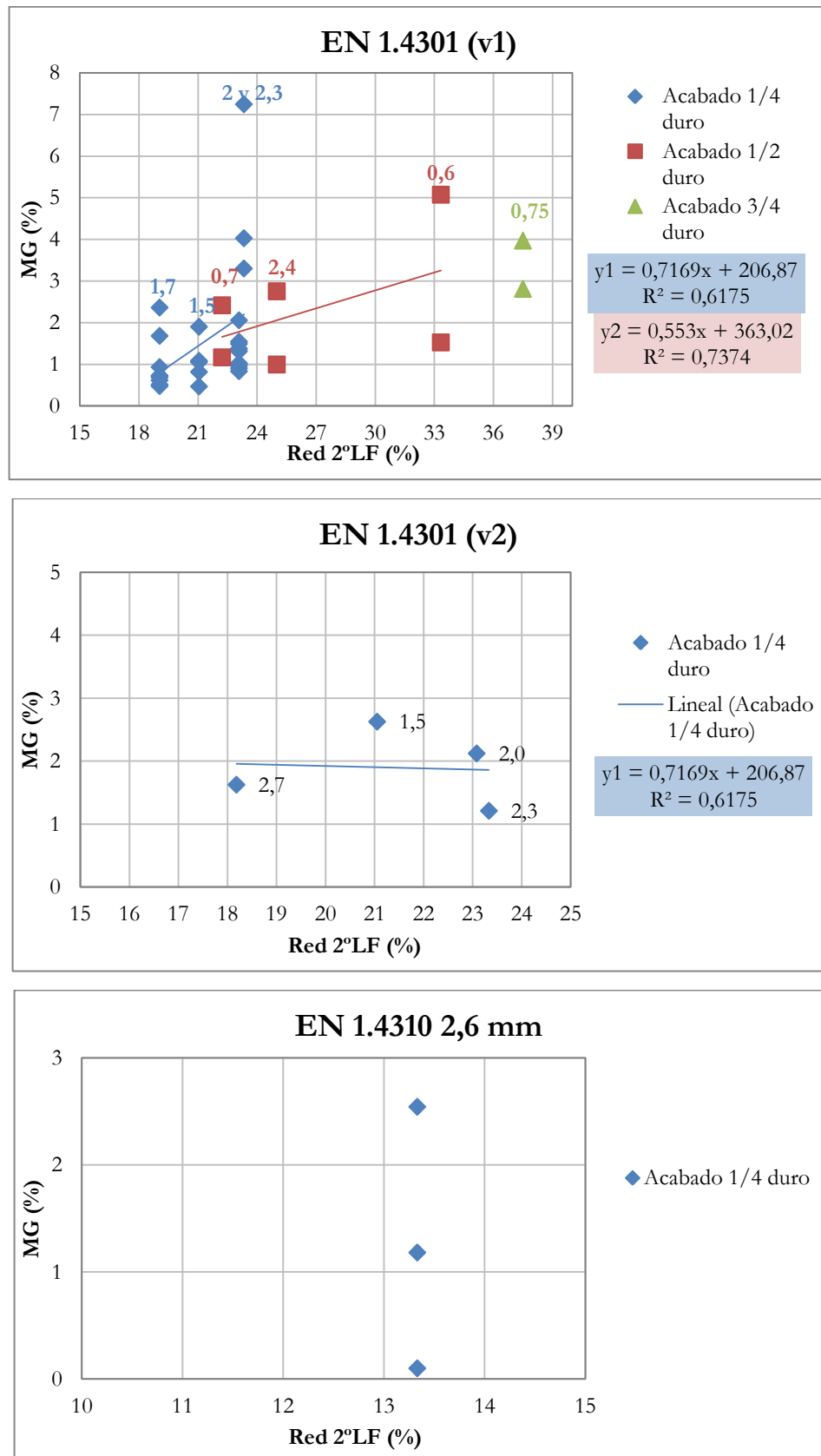


Figura 5.13.- Relación del contenido de magnetismo y del grado de reducción

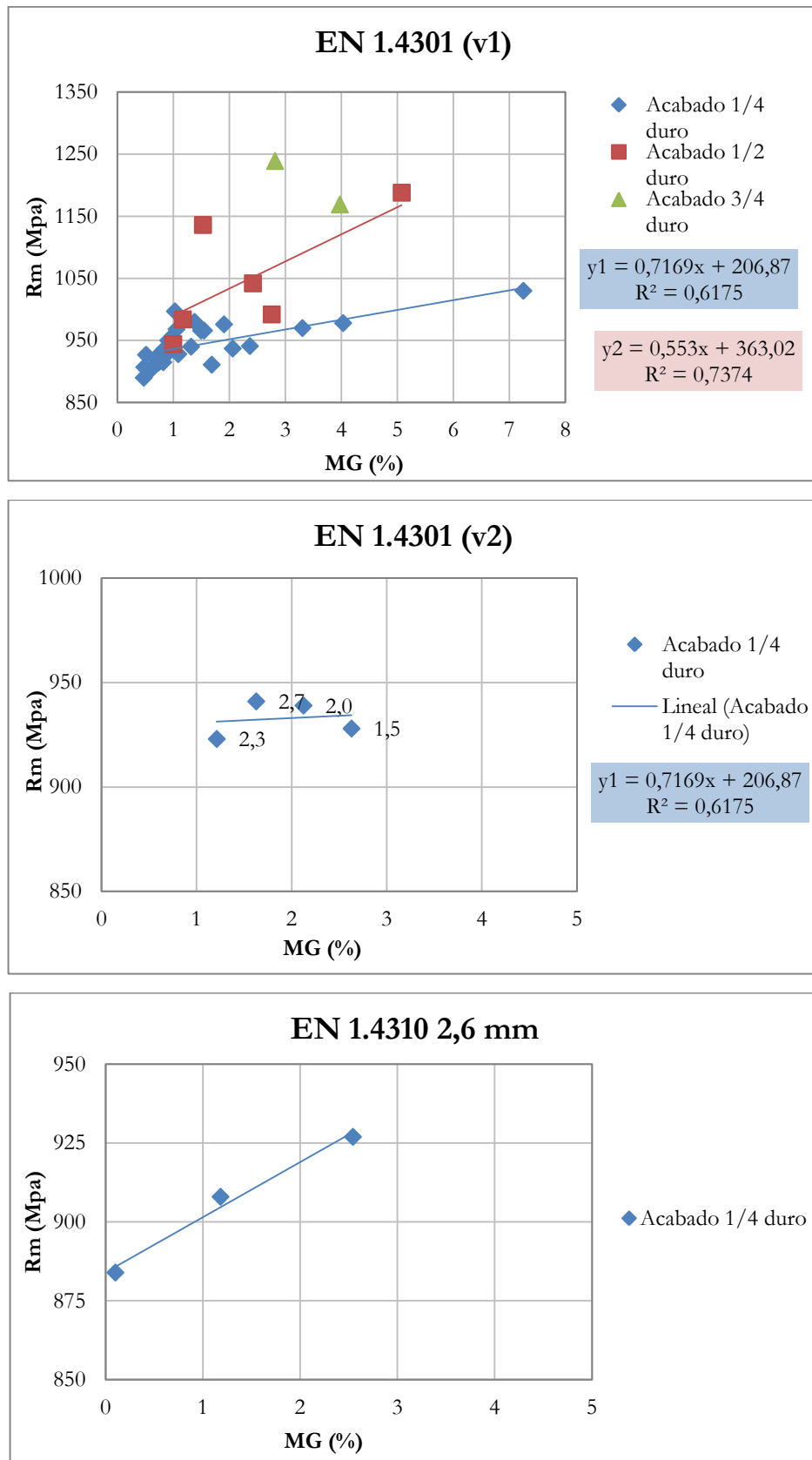


Figura 5.14.- Relación del contenido de magnetismo y de la resistencia a la tracción

En la figura 5.13 se observa que independientemente del tipo de acero, a mayor reducción en la segunda laminación mayor grado de magnetismo presenta el material por la transformación de la austenita en martensita. La figura 5.14 muestra que a medida que aumenta el grado de magnetismo, la resistencia mecánica es mayor (mayor grado de deformación del material).

#### **5.2.5. Resultados de los ensayos para la caracterización mecánica de los materiales acopiados**

Los aceros inoxidables endurecidos por deformación en frío se caracterizan por tener unos valores elevados de resistencia a la tracción y límite elástico respecto a los valores generales de un acero con acabado 2B, y una considerable disminución del alargamiento. La evaluación de las propiedades mecánicas permite conocer el comportamiento de estos aceros para establecer el uso más conveniente de los mismos.

Por otro lado, la medida de la dureza puede aportar una idea comparativa de la resistencia del material, de su resistencia a la penetración y al desgaste, del conocimiento de su posibilidad de mecanización y conformado, etc.

Los resultados de las propiedades mecánicas tras el ensayo de tracción a temperatura ambiente en la dirección transversal al sentido de laminación y los valores de dureza obtenidos a partir de los distintos durómetros según el espesor de la probeta, se muestran en las tablas 5.13-5.15.

Además, para el establecer una comparativa y ver la influencia del grado de endurecimiento en el comportamiento mecánico de los materiales, se ha añadido en dichas tablas los valores medios de una cierta población de materiales con acabados 2B a partir de la base de datos de ensayos disponible en Acerinox Europa S.A.U.

NOTA: En este TFC se ha realizado el ensayo de tracción a temperatura ambiente en las tres direcciones al sentido de laminación: longitudinal, diagonal y transversal a todos los materiales. Estos resultados se muestran en las tablas del Anexo III.

**a) Grado de endurecimiento ¼ duro**

ID	Espesor (mm)	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	E (MPa)
<b>1.4301 (v1)</b>						
1A	1,5	928	787	21,06	312	191.058
1B		968	811	11,51	320	230.231
1C		915	776	22,08	308	202.410
1D		890	735	23,50	292	184.727
1E		976	800	19,26	325	202.335
ACA 2B		646,67	312,91	52,4	170	200.000*
2A	1,7	905	762	23,99	285	217.808
2B		914	775	20,67	297	201.993
2C		907	772	19,27	296	185.045
2D		925	775	22,23	299	191.510
2E		911	747	25,61	298	185.441
2F		933	798	20,30	309	210.273
2G		919	768	24,84	295	195.547
2H		927	798	21,99	315	188.295
2I		941	752	22,89	302	177.987
ACA 2B		646,4	313,3	52,25	170	200.000*
3A	2	937	769	22,88	303	197.201
3B		966	800	15,70	313	196.188
3C		980	818	18,10	310	187.828
3D		997	849	13,32	314	197.243
3E		956	814	17,02	310	217.184
3F		950	787	18,81	308	233.532
3G		936	802	15,67	304	199.575
3H		966	820	18,59	308	179.848
3I		940	781	20,55	298	197.201
ACA 2B		645,89	319,16	53,06	171,28	200.000*
4A	2,3	978	822	20,63	337	181.354
4B		1030	803	20,06	346	188.314

ID	Espesor (mm)	Rm (MPa)	Rp <sub>0.2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	E (MPa)
4C		970	822	18,57	318	217.749
ACA 2B		646,76	321,33	53,08	170	200.000*
EN 1.4301 (v2)						
5	1,5	928	753	22,09	295	205.331
ACA 2B		628	295	54,26	159	200.000*
6	2,0	939	813	13,24	306	197.974
ACA 2B		626	293	53,40	159	200.000*
7	2,3	923	780	15,75	318	175.754
ACA 2B		634	301	50,92	154	200.000*
8	2,7	941	826	19,05	337	189.927
ACA 2B		626	280	52,10	160	200.000*
EN 1.4310						
9A	2,3	908	734	28,07	295	168.820
9B		884	732	31,89	310	194.121
9C		927	690	30,96	303	202.335
ACA 2B		-	-	-	-	-

\* Dato según bibliografía

Tabla 5.13.- Propiedades mecánicas de los materiales ¼ duro

NOTA: En Acerinox Europa S.A.U no se suele fabricar EN 1.4310 con acabado 2B.

**b) Grado de endurecimiento ½ duro**

1.4301 (v1)						
ID	Espesor (mm)	Rm (MPa)	Rp <sub>0.2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	E (MPa)
10A	0,6	1188	957	7,84	381	224.065
10B		1136	941	7,57	357	197.802
ACA 2B		654	295	55,25	166	200.000*
11A	0,7	1042	848	14,60	344	197.839
11B		984	825	16,34	325	207.089
ACA 2B		644	295	55,15	165	200.000*
12A	2,4	944	826	16,88	328	193.508
12B		992	860	13,20	346	203.659
ACA 2B		647	321	53,08	170	200.000*

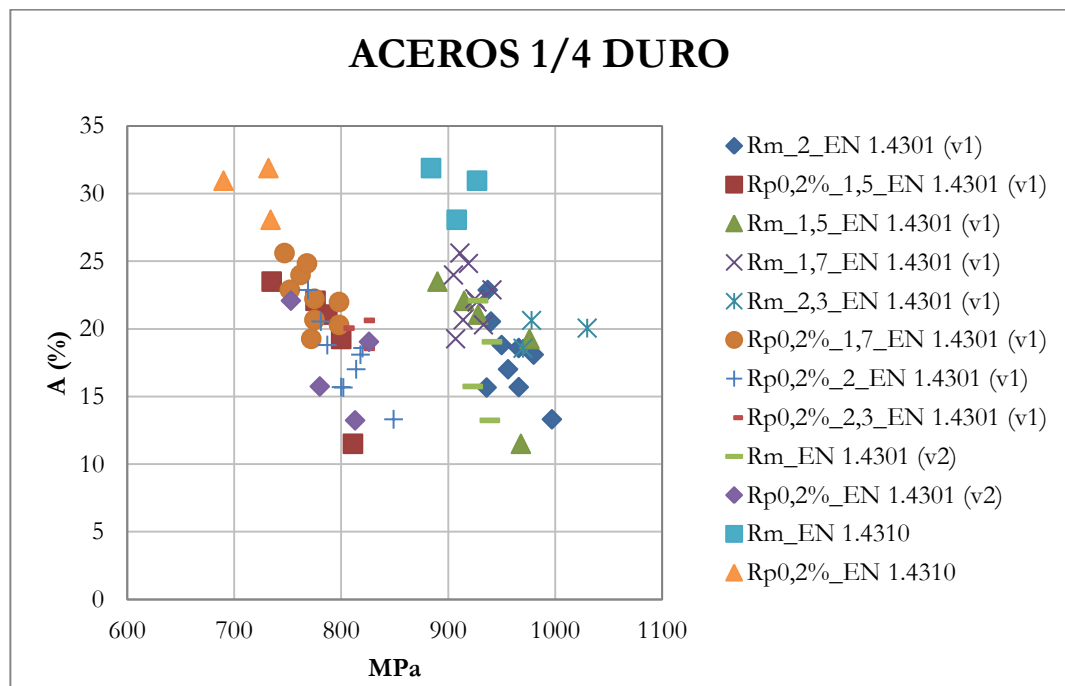
Tabla 5.14.- Propiedades mecánicas de los materiales ½ duro

c) Grado de endurecimiento  $\frac{3}{4}$  duro

1.4301 (v1)						
ID	Espesor (mm)	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	E (MPa)
13A	0,75	1169	962	6,87	355	206.902
13B		1239	1022	6,17	365	216.732
ACA 2B		648	294	57,4	161	200.000*

Tabla 5.15.- Propiedades mecánicas de los materiales  $\frac{3}{4}$  duro

## d) Influencia del grado de endurecimiento en las propiedades mecánicas de los acabados endurecidos por deformación en frío

Figura 5.15.- Representación gráfica de las propiedades mecánicas de los materiales  $\frac{1}{4}$  duro

A partir de las figuras 5.16 – 5.18, se muestran las relaciones existentes entre las propiedades mecánicas básicas según el tipo de acero, espesor y grado de endurecimiento.



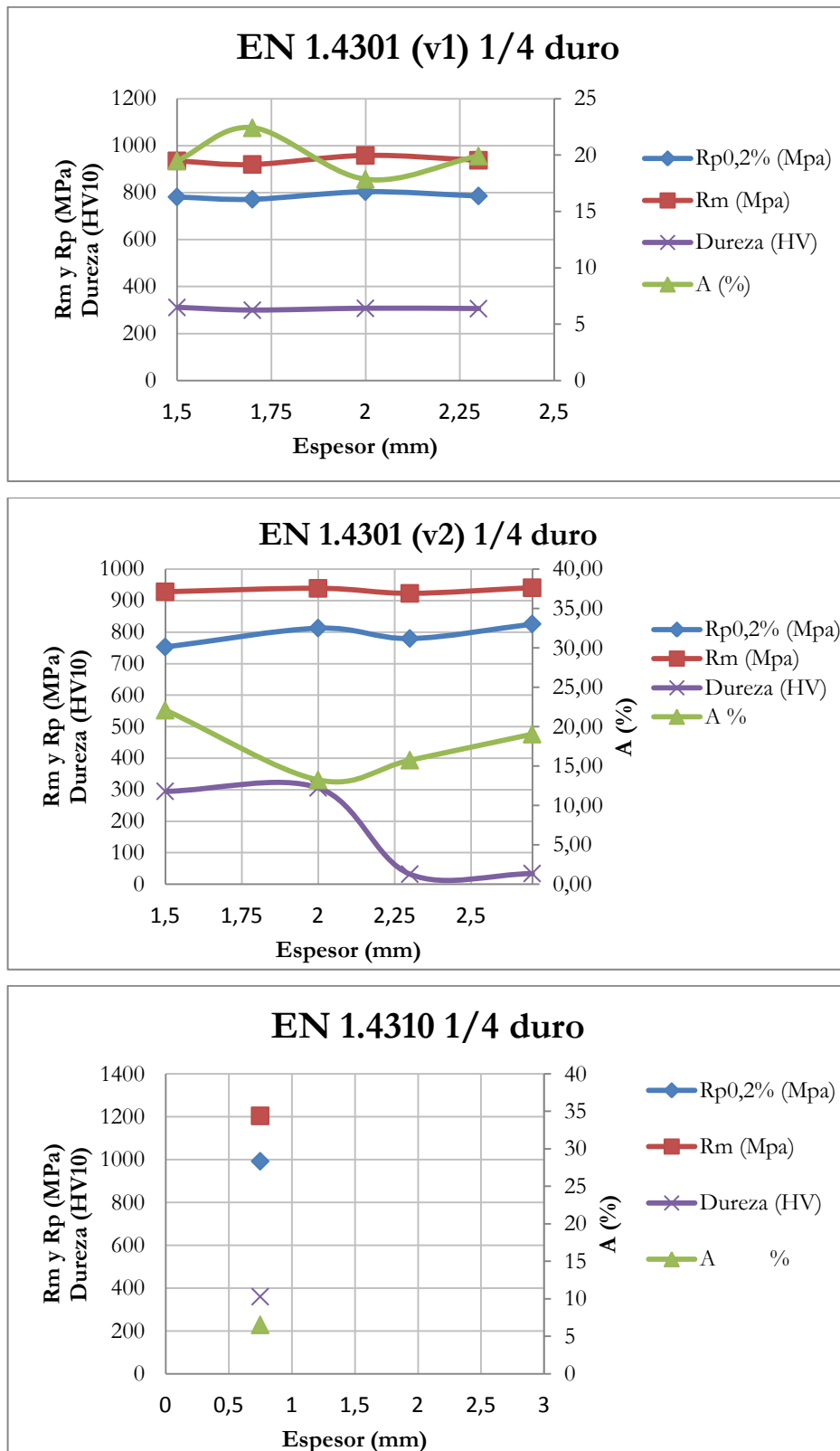


Figura 5.16.- Valores medios de las propiedades mecánicas por tipo de acero 1/4 duro

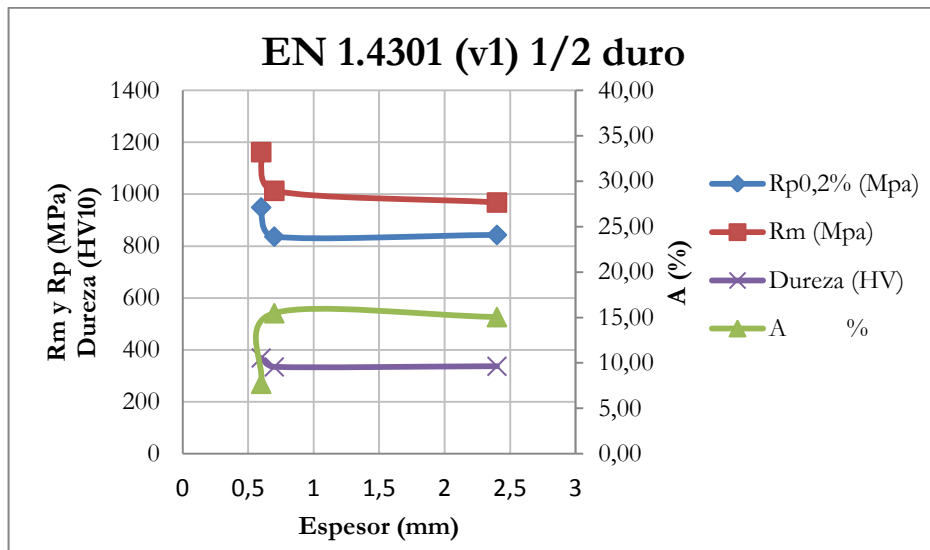


Figura 5.17.- Valores medios de las propiedades mecánicas por tipo de acero 1/2 duro

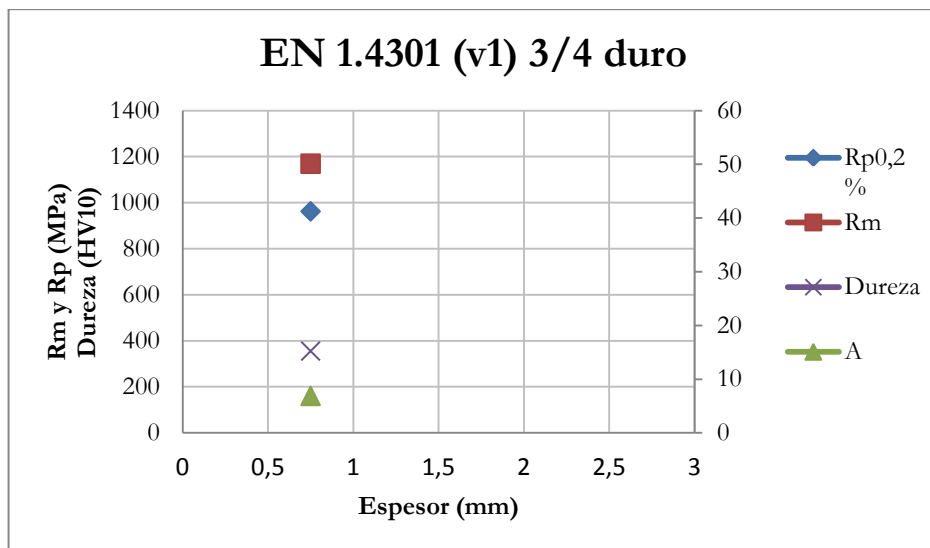


Figura 5.18.- Valores medios de las propiedades mecánicas por tipo de acero 3/4 duro

Para la comparación de las altas prestaciones que proporcionan los distintos grados de endurecimiento a los materiales, respecto a un acabado 2B se representa en los figuras 5.19 y 5.20.

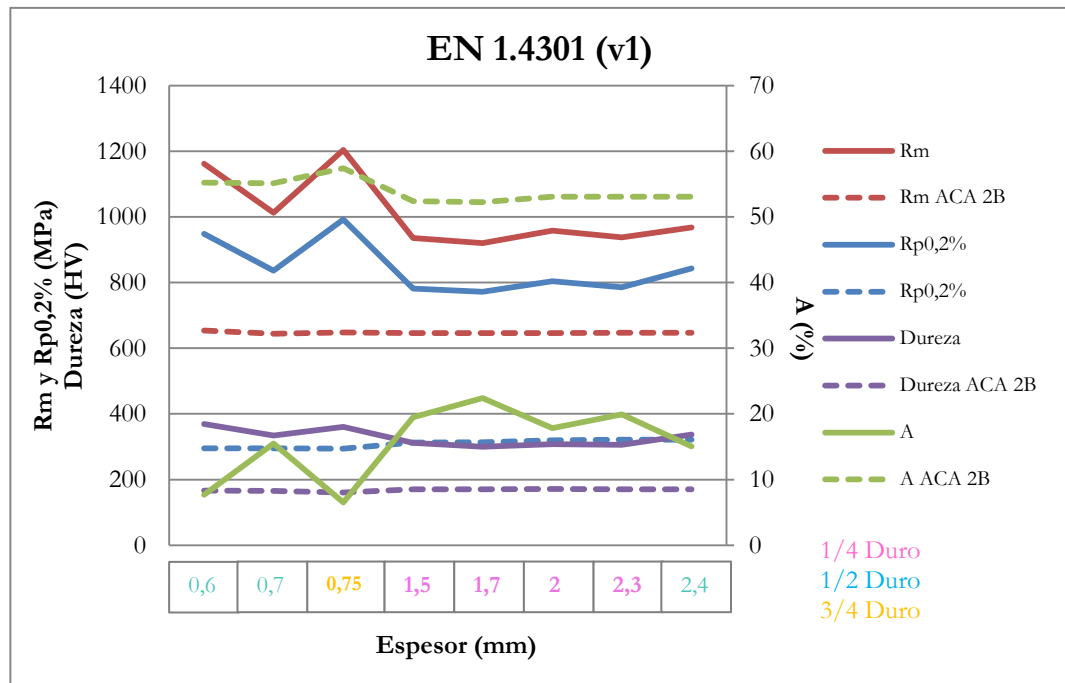


Figura 5.19.- Relación entre las propiedades mecánicas del tipo EN 1.4301 (v1) con distintos acabados endurecidos por deformación y con acabados 2B

A partir de la figura 5.19 se observa para los valores de límite elástico, de resistencia a la tracción y de dureza para los tres acabados endurecidos ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$ ) del tipo de acero **1.4301 (v1)** son en la mayoría de los casos más del doble que para un acabado 2B, ampliándose la diferencia entre ambos acabados a medida que se incrementa el grado de endurecimiento (diferencia entre ACA 2B -  $\frac{1}{4}$  < ACA 2B -  $\frac{1}{2}$  < ACA 2B -  $\frac{3}{4}$ ). En cuanto al alargamiento, la diferencia entre ambos se acentúa hasta el punto de 5 veces menos en el caso de los aceros endurecidos que para un acabado 2B, sobre todo en los grados  $\frac{1}{2}$  y un  $\frac{1}{4}$  duro.

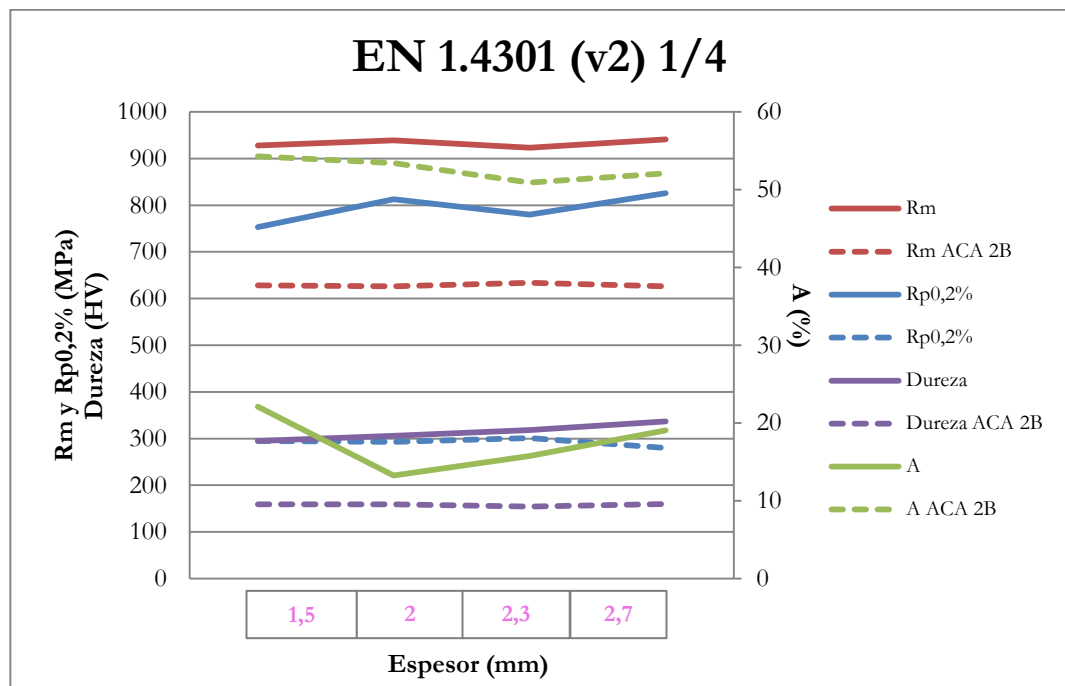


Figura 5.20.- Relación entre las propiedades mecánicas del tipo EN 1.4301 (v2) con grado 1/4 duro y con acabados 2B

Para el tipo de acero **EN 1.4301 (v2)** ocurre lo mismo que en el caso anterior. Los valores de resistencia a la tracción, de límite elástico y de dureza son bastante más superiores en los acabados endurecidos que en los acabados 2B. En el caso del alargamiento, en el primero de los acabados disminuye drásticamente mientras que para un acabado 2B es bastante elevado.

### 5.2.6. Evaluación del acabado superficial

La evaluación del acabado superficial indica el estado superficial tras el proceso de fabricación de un material. Esta información puede resultar interesante para materiales que son sometidos a operaciones de conformado para evaluar la calidad superficial del material.

Para la medida de este parámetro se ha utilizado un rugosímetro Perthometer que proporciona el perfil lineal de la superficie formados por una serie de entrantes y

salientes cuya separación y altura dependen del acabado del material. De esta forma se evalúan las distintas irregularidades de la superficie de un material a partir del parámetro de rugosidad media mostrados en las tablas 5.16-5.18

**a) Grado de endurecimiento ¼ duro**

ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Ra	
			Cara A	Cara B
1.4301 (v1)				
1A	1,5	70,0	0,108	0,168
1B			0,916	1,030
1C			0,178	0,183
1D			0,160	0,172
1E			0,158	0,145
2A	1,7	66,0	0,124	0,133
2B			0,142	0,128
2C			0,124	0,125
2D			0,138	0,174
2E			0,127	0,125
2F			0,195	0,166
2G			0,120	0,126
2H			0,139	0,114
2I			0,125	0,140
3A	2,0	60,0	0,171	0,171
3B			0,194	0,169
3C			0,583	0,709
3D			0,150	0,121
3E			0,164	0,185
3F			0,872	0,826
3G			0,166	0,157
3H			0,178	0,147
3I			0,168	0,142
4A	2,3	61,67	0,145	0,186
4B			0,170	0,176
4C			0,787	0,789

ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Ra	
			Cara A	Cara B
1.4301 (v2)				
5	1,5	70,00	0,349	0,156
6	2,0	60,00	0,151	0,176
7	2,3	61,67	0,138	0,162
8	2,7	55,00	0,139	0,105
1.4310				
9A	2,6	48,00	0,183	0,186
9B			0,661	0,676
9C			0,174	0,194

Tabla 5.16.- Resultados de la medida de la rugosidad media superficial de los materiales  $\frac{1}{4}$  duro

b) Grado de endurecimiento  $\frac{1}{2}$  duro

1.4301 (v1)				
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Ra	
			Cara A	Cara B
10A	0,6	85,00	0,137	0,156
10B			0,131	0,134
11A	0,7	82,50	0,131	0,153
11B			0,153	0,159
12A	2,4	60,00	0,176	0,165
12B			0,171	0,182

Tabla 5.17.- Resultados de la medida de la rugosidad media superficial de los materiales  $\frac{1}{2}$  duro

c) Grado de endurecimiento  $\frac{3}{4}$  duro

1.4301 (v1)				
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Ra	
			Cara A	Cara B
13A	0,75	83,33	0,142	0,138
13B			0,186	0,159

Tabla 5.18.- Resultados de la medida de la rugosidad media superficial de los materiales  $\frac{3}{4}$  duro

Para ver la influencia del grado de deformación se comparan los resultados obtenidos de la medida de la rugosidad media de los acabados endurecidos mostrados en las tablas 5.16-5.18 con el valor de rugosidad media de 0,124 de un acero inoxidable austenítico con acabado 2B obtenido a partir de la media aritmética de los valores de rugosidad media de la base de datos de ensayo de Acerinox Europa S.A.U, observándose que la mayoría de los casos de los materiales estudiados muestran unos valores de rugosidad media aproximada o ligeramente superior a un acabado 2B. Por lo que se puede deducir que el grado de endurecimiento no presenta una influencia significativa en la calidad del acabado superficial del material.

### 5.3. Estudio de la conformabilidad de los aceros endurecidos por deformación en frío

Uno de los procesos de fabricación más habituales dentro del uso de los aceros inoxidables endurecidos por deformación en frío son las operaciones de conformado. Para evaluar la conformabilidad de éstos materiales, se ha llevado a cabo la obtención de los siguientes parámetros:

- Doblado
- Coeficiente de anisotropía ( $r$ ), anisotropía media ( $r_m$ ) y anisotropía planar ( $\Delta r$ )
- Exponente de endurecimiento “ $n$ ” en la dirección transversal ( $n_T$ )
- Índice Erichsen (IE)
- Recuperación elástica o Springback (SPB)

Los resultados de la medida de estas propiedades se muestran en las tablas 5.19-5.21

Señalar en primer lugar que en algunos casos no se han podido determinar los **coeficiente de anisotropía  $r$  o Lankford** a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , ni por tanto los valores de  $r_m$  y  $\Delta r$  en aquellos casos en los que el alargamiento a rotura ha sido inferior al 10%, ya que éste es el valor superior del rango en el que se mide este parámetro. Por ello, que en las tablas 5.19-5.21 sólo se muestran los valores de  $r_m$  y de  $\Delta r$  de los materiales en los que se tiene disponible los coeficientes Lankford en las tres direcciones. Los resultados de los índices  $r$  en las tres direcciones se incluyen en las tablas del Anexo III.

Para la obtención del **exponente de endurecimiento “ $n$ ”** ocurre algo similar que en el caso anterior. En el capítulo de materiales y métodos se describió que el exponente de endurecimiento “ $n$ ” se calcula en el rango de deformación entre el 8-13%. Dado que algunos de los materiales seleccionados en este TFC tienen valores de deformación inferiores al 8%, no se ha podido determinar este parámetro en dichos casos. Por otro lado, la dirección más influyente en el comportamiento de un material en operaciones de estirado es la transversal, por ello en las tablas 5.19 – 5.21 se muestran los valores del exponente “ $n$ ” exclusivamente en dicha dirección. Los



resultados de los exponentes de endurecimiento “n” en las tres direcciones se muestran en las tablas del Anexo III.

El equipo disponible para la determinación del **índice Erichsen** en la dirección transversal solo permite la obtención de este parámetro en materiales endurecidos por deformación en frío con espesores menores o iguales a 2mm. Los resultados se muestran en las tablas 5.19-5.21.

Por último, en las tablas 5.19-5.21 se incluyen los resultados obtenidos tras el ensayo de simulación de **recuperación elástica o springback**. El resto de las variables implícitas en la obtención de este parámetro se incluyen las tablas del Anexo IV.

**a) Grado de endurecimiento ¼ duro**

ID	Espesor (mm)	Doblado	$r_m$	$\Delta r$	$n_T$	IE (mm)	SPB
1.4301 (v1)							
1A	1,5	Apto	-	-	0,091	10,03	20,24
1B		Apto	-	-	-	10,25	20,24
1C		Apto	-	-	0,102	9,91	20,24
1D		Apto	0,726	0,022	0,104	9,16	20,24
1E		Apto	-	-	0,104	9,85	19,76
2A	1,7	Apto	0,844	-0,156	0,101	10,01	19,28
2B		Apto	-	-	0,093	10,28	21,64
2C		Apto	-	-	0,089	10,19	19,28
2D		Apto	-	-	0,100	10,62	19,28
2E		Apto	0,858	0,148	0,118	10,29	19,28
2F		Apto	-	-	0,096	9,77	19,28
2G		Apto	0,713	0,501	0,106	10,26	19,28
2H		Apto	-	-	0,097	10,37	18,29
2I		Apto	0,703	0,084	0,121	9,64	18,79
3A	2	Apto	0,939	0,051	0,107	10,34	18,29
3B		Apto	-	-	0,077	10,41	18,29
3C		Apto	-	-	0,083	10,30	18,29
3D		Apto	-	-	-	10,60	18,79
3E		Apto	-	-	0,083	9,94	18,29

ID	Espesor (mm)	Doblado	r <sub>m</sub>	Δr	n <sub>T</sub>	IE (mm)	SPB
3F		Apto	-	-	0,093	10,52	17,79
3G		Apto	-	-	0,074	9,97	17,79
3H		Apto	-	-	0,079	9,86	17,28
3I		Apto	-	-	0,097	9,50	18,29
4A	2,3	Apto	-	-	0,101	-	17,79
4B		Apto	0,717	0,112	0,124	-	15,72
4C		Apto	-	-	0,090	-	15,19
EN 1.4301 (v2)							
5	1,5	Apto	-	-	0,106	9,71	18,79
6	2,0	Apto	-	-	-	10,65	18,29
7	2,3	Apto	-	-	0,071	-	15,72
8	2,7	Malo	-	-	0,080	-	14,10
1.4310							
9A	2,3	Apto	1,267	0,313	0,131	-	13,55
9B		Apto	0,555	0,202	0,129	-	13,55
9C		Apto	0,266	0,016	0,241	-	14,76

Tabla 5.19.- Resultados de las propiedades analizadas para el estudio de conformabilidad de los materiales  $\frac{1}{4}$  duro

**b) Grado de endurecimiento  $\frac{1}{2}$  duro**

<b>1.4301 (v1)</b>							
ID	Espesor (mm)	Doblado	$r_m$	$\Delta r$	$n_T$	IE (mm)	SPB
10 <sup>a</sup>	0,6	Apto	-	-	-	7,03	32,66
10B		Malo	-	-	-	7,18	31,28
11 <sup>a</sup>	0,7	Apto	-	-	0,087	8,67	30,21
11B		Apto	-	-	-	8,72	27,96
12 <sup>a</sup>	2,4	Apto	-	-	0,082	-	16,25
12B		Apto	-	-	-	-	15,19

Tabla 5.20.- Resultados de las propiedades analizadas para el estudio de conformabilidad de los materiales  $\frac{1}{2}$  duro

c) Grado de endurecimiento  $\frac{3}{4}$  duro

1.4301 (v1)							
ID	Espesor (mm)	Doblado	$r_m$	$\Delta r$	$n_T$	IE (mm)	SPB
13 <sup>a</sup>	0,75	Malo	-	-	-	8,84	30,21
13B		Malo	-	-	-	7,62	29,47

Tabla 5.21.- Resultados de las propiedades analizadas para el estudio de conformabilidad de los materiales con grado de endurecimiento  $\frac{3}{4}$  duro

## 5.3.1. Resultados de la evaluación de la aptitud al doblado

La deformación por doblado está presente en la mayoría de las operaciones de conformado. En una operación de doblado se aplica una fuerza de pisado a partir de un punzón (por ejemplo) con un ángulo determinado según el diámetro del punzón, provocando una deformación en el material; de modo que a medida que el punzón va adentrándose en el material, éste va perdiendo su capacidad de deformarse.

En este TFC se ha realizado la operación de doblado a  $180^\circ$  con un radio de doblado de  $\frac{1}{2}$  el espesor de la chapa.

Los resultados incluidos en las tablas 5.19-5.21 muestran que todos los materiales de **EN 1.4301 (v1)** con grado de endurecimiento  $\frac{1}{4}$  son aptos al doblado a  $180^\circ$ , los materiales  $\frac{1}{2}$  duro también son aptos en su mayoría a excepción de uno de los materiales (espesor 0,6 mm), y que todos los materiales  $\frac{3}{4}$  duro presentaron grietas antes de alcanzar el ángulo requerido. Los casos en los que no fueron aptos al doblado a  $180^\circ$  se sometieron a un doblado a un ángulo inferior de  $135^\circ$ , obteniendo unos resultados satisfactorios.

Para la mayoría de los materiales de los tipos de acero **EN 1.4301 (v2)** y **EN 1.4310** se observa que el comportamiento al doblado a  $180^\circ$  es bueno a excepción del material con espesor de 2,7 mm de EN 14301 (v2).

Tras analizar todos los resultados obtenidos se deduce una tendencia, donde a mayor grado de endurecimiento el material va perdiendo su aptitud al doblado, sobre todo en los casos de los espesores finos (mayores reducciones en su proceso de fabricación).

Además, se comprueba que todos los materiales estudiados son aptos para operaciones de doblado por debajo de un ángulo de  $135^\circ$  utilizando un radio de doblado de  $\frac{1}{2}$  el espesor.

### **5.3.2. Análisis de los resultados para la evaluación de la aptitud de los materiales endurecidos en operaciones de embutición**

La aptitud de los materiales endurecidos por deformación en frío en operaciones donde prevalece el modo de deformación por embutición, depende principalmente de la anisotropía.

El coeficiente de anisotropía  $r$  es el cociente de la variación del ancho y la deformación del espesor (ec 2.12). La anisotropía media ( $r_m$ ) determina la profundidad media de embutición y se calcula a partir de los valores individuales de  $r$  en las tres direcciones al sentido de laminación ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ) en el Anexo III.

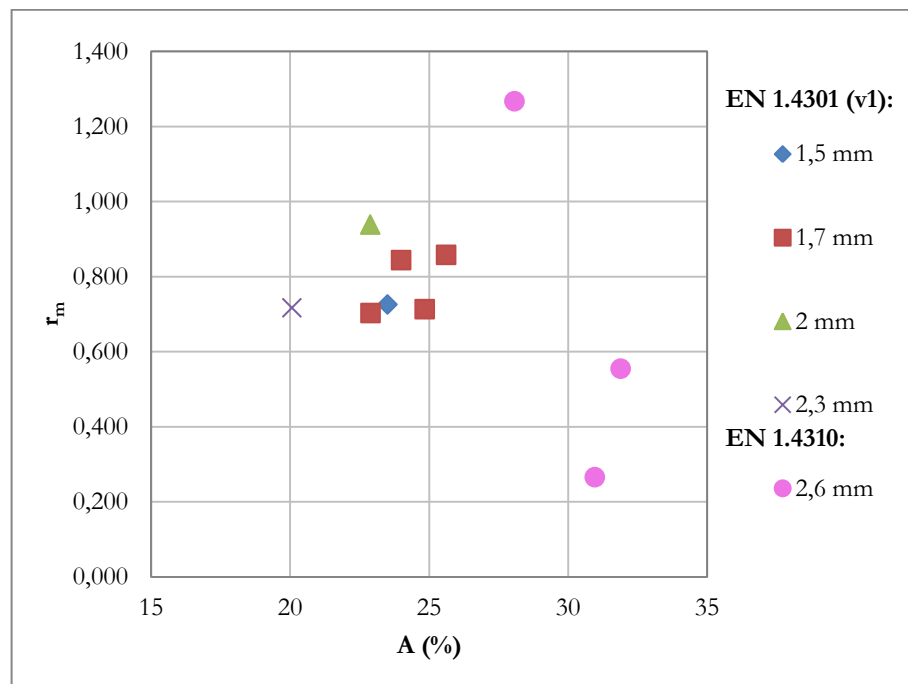


Figura 5.21.- Estudio de la influencia del alargamiento del material de partida en los valores de anisotropía medio ( $r_m$ )

A partir de la figura 5.21 se ha abordado el estudio de la influencia del alargamiento de partida en operaciones de embutición en función del valor de anisotropía medio ( $r_m$ ). Para el tipo de acero **EN 1.4301 (v2)** no se ha podido determinar los valores del coeficiente  $r$  en las tres direcciones para ninguno de los materiales, por lo que no se ha podido establecer ninguna relación de  $r_m$ . En cuanto al tipo de acero **EN 1.4301 (v1)** se observa que la anisotropía media se concentra entre 0,7-0,9 para todos los resultados obtenidos en un rango del 20-26% de alargamiento en función del espesor (a excepción del material de 1,7mm). Por último, para el tipo **EN 1.4310** se observa una dispersión entre los resultados de  $r_m$  para unos valores de alargamiento entre el 27-32%. No obstante, debido a la escasa población analizada, no se ha podido establecer una tendencia clara en ninguno de los casos analizados.

Para concluir, una cualidad deseada en los materiales para operaciones de embutición es que tengan un valor de  $r_m$  superior a 1 ya que indica una mayor deformación en el ancho que en el espesor. Tras observar los resultados mostrados en la figura 5.21, todos los valores de  $r_m$  están por debajo de 1 (excepto uno de los materiales de EN

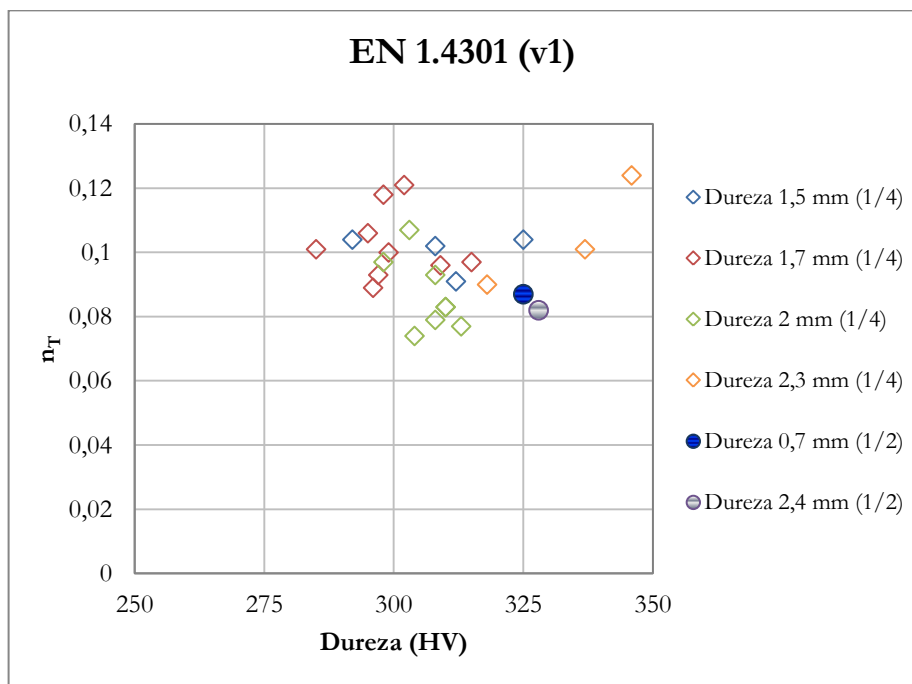
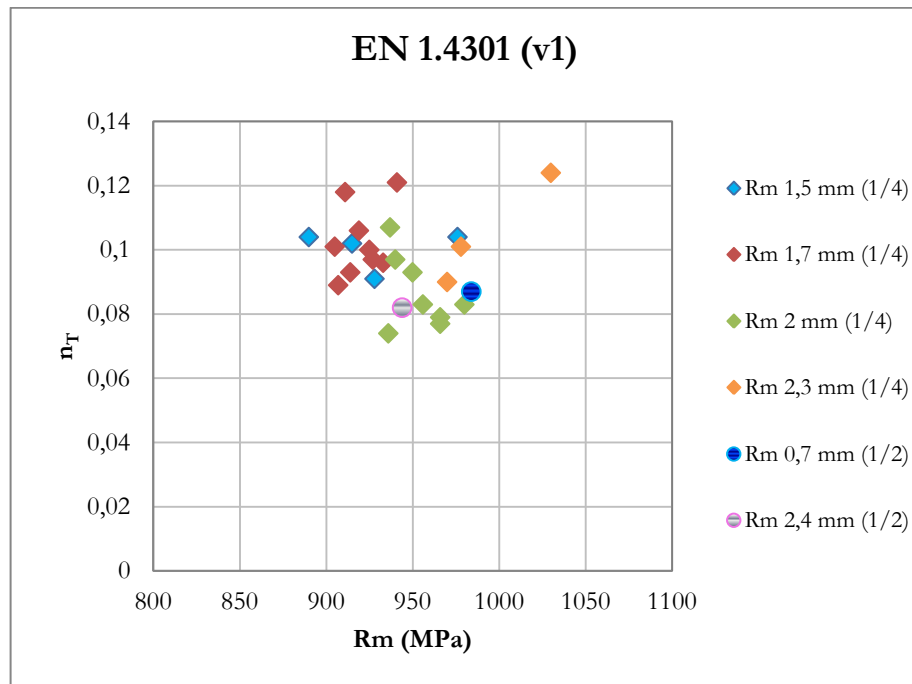
1.4310) lo que significa que los materiales endurecidos por deformación en frío no presentan buenas cualidades para operaciones de embutición.

### **5.3.3. Análisis de los resultados para el estudio del comportamiento al estirado**

La aptitud de los materiales endurecidos por deformación en frío a operaciones de conformado por estirado en este TFC se lleva a cabo mediante la realización de los ensayos de determinación del: exponente de endurecimiento “n” y del índice Erichsen.

#### **a) Determinación del exponente de endurecimiento “n”**

La obtención del **exponente de endurecimiento “n”** se calcula en el rango de deformación entre el 8-13% a partir de la ec 2.10. Para la evaluación del comportamiento de los materiales seleccionados en operaciones de estirado, se ha estimado la relación entre el exponente de endurecimiento “n” y la resistencia a la tracción y a la dureza que presentan. Las figuras 5.22-5.24 muestran estas relaciones para los diferentes tipos de aceros estudiados, deduciéndose por lo general que a mayor valor de “n” mayor tendencia a endurecerse el material en operaciones de conformado.



*Figura 5.22.- Relación del exponente de endurecimiento “n” frente a la resistencia a la tracción (superior) y a la dureza (inferior) del tipo de acero EN 1.4301 (v1)*

No se han podido obtener los valores del coeficiente de endurecimiento “n” del tipo **EN 1.4301 (v1)** del grado de endurecimiento  $\frac{1}{2}$  duro con espesor 0,6 mm y del grado  $\frac{3}{4}$  duro en ninguno de los materiales estudiados.

El tipo de acero **EN 1.4301 (v1)** presenta una ligera tendencia entre todos los resultados obtenidos, **donde se observa en la mayoría de los casos que a menor resistencia a la tracción mayor exponente de endurecimiento y mayor nivel de dureza.**

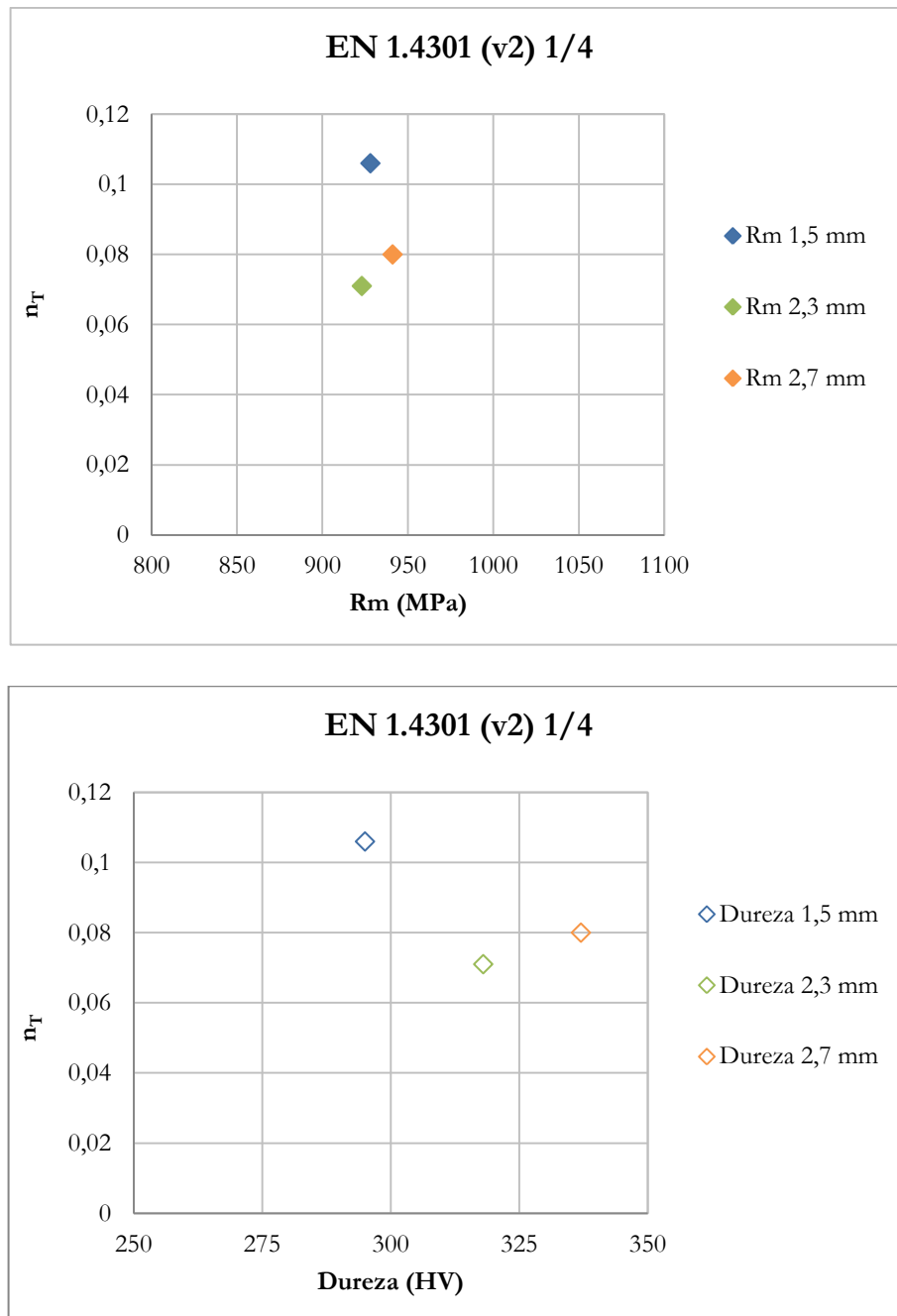


Figura 5.23.- Relación del exponente de endurecimiento “n” y la resistencia a la tracción (superior) y a la dureza (inferior) del tipo de acero EN 1.4301 (v2)



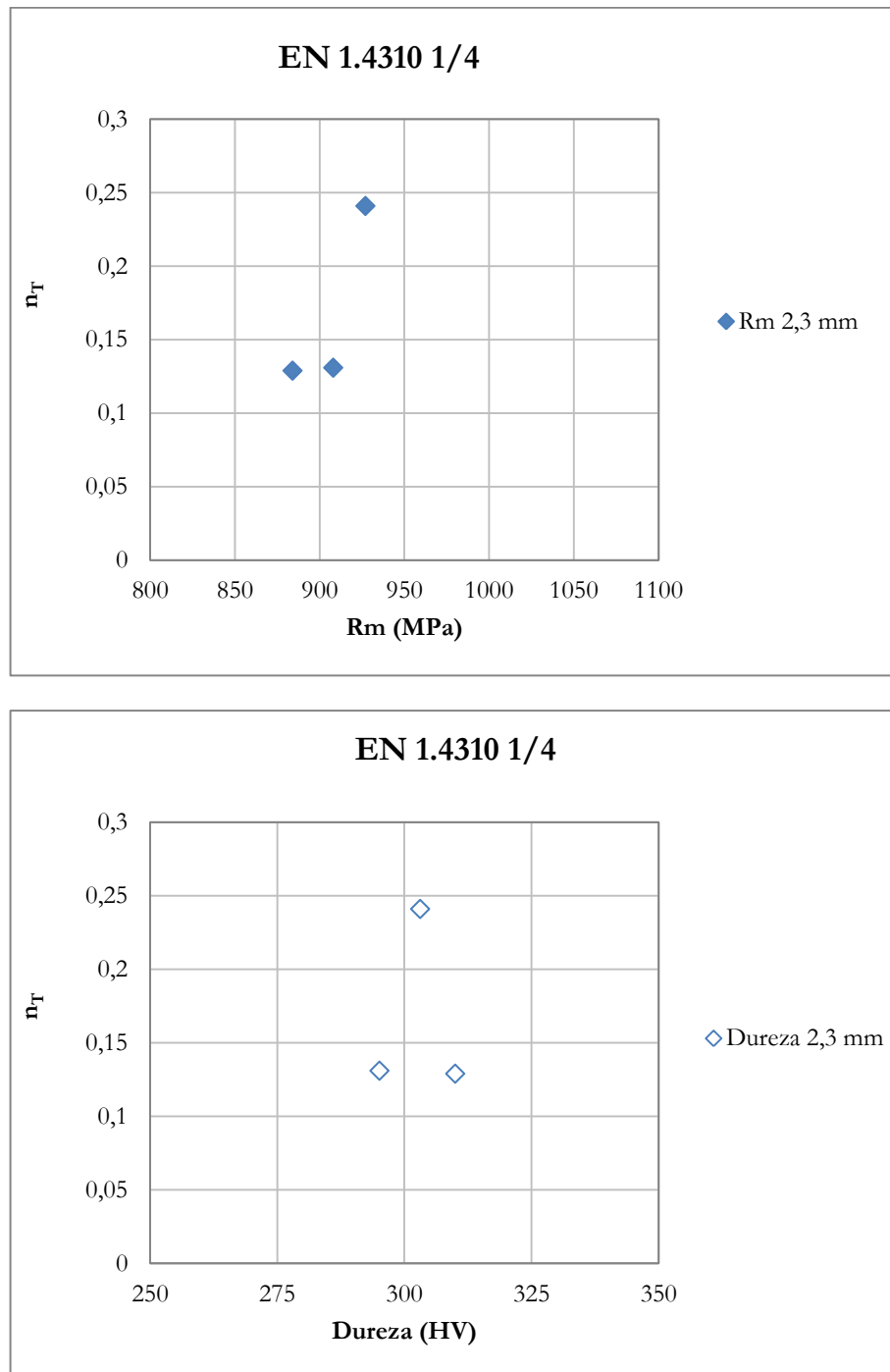


Figura 5.24.- Relación del exponente de endurecimiento “ $n$ ” y la resistencia a la tracción (superior) y a la dureza (inferior) del tipo de acero EN 1.4310

Dada la escasa población de datos para el tipo **EN 1.4301 (v2)** y el **EN 1.4310** (figuras 5.23-5.24) no cabe plantear ningún tipo de tendencia.



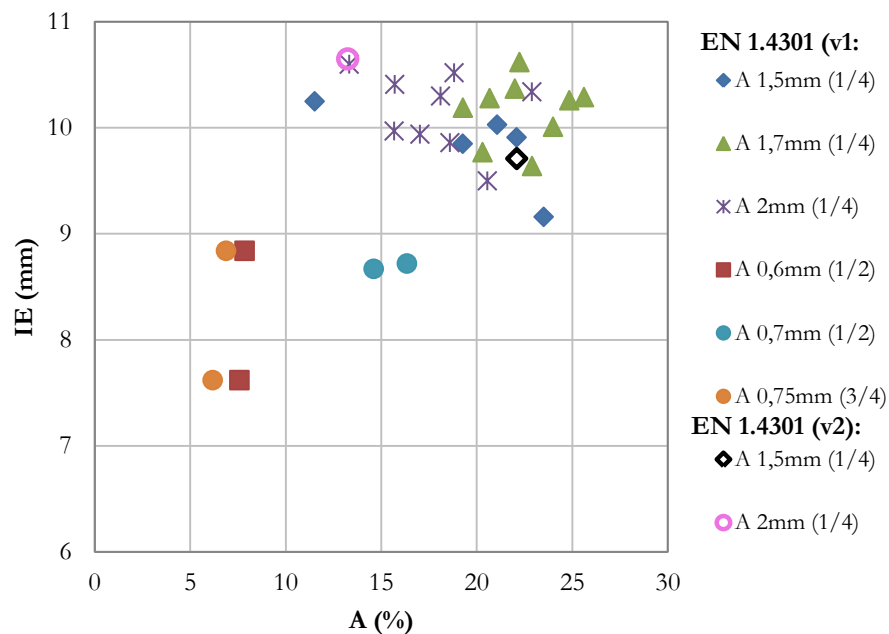


Figura 5.26.- Relación entre el índice Erichsen y el alargamiento de los tipos de acero EN 1.4301 (v1) y (v2)

Se observa una tendencia clara en la que a mayor alargamiento mayor nivel de estirado, además se deduce que a menor resistencia del material, mayor valor del índice Erichsen. El grado de endurecimiento está implícito en los valores de resistencia a la tracción.

#### 5.3.4. Recuperación elástica del material

La recuperación elástica o *springback* es otro de los factores influyentes en el comportamiento del material en operaciones de conformado. Esta propiedad se mide a nivel experimental en este TFC mediante el equipo termomecánico Gleeble 1500D tal como se describió en el capítulo de materiales y métodos.

Los parámetros considerados en este ensayo son: espesor, reducción acumulada, fuerza, tensión y SPB incluidos en las tablas del Anexo IV, a partir de los cuales se deduce que los materiales de mayor espesor requieren de una fuerza y tensión mayor,

y presentan una recuperación elástica menor. Además en dicho anexo, en la figura AIV.1 se muestran las probetas ensayadas, donde se observa que ha mayor espesor, menor distancia y ángulo entre las alas presenta el material y obteniendo una menor recuperación elástica.

A partir de los datos de las tablas 5.18-5.20 y del uso de las herramientas informáticas más convenientes, se ha estimado que el *springback* depende fundamentalmente del límite elástico y del espesor. Esta relación se cuantifica a partir del cálculo de una recta de regresión multivariable para cada tipo de acero (ec 5.1 – 5.3). Para confirmar que la ecuación calculada se ajusta adecuadamente a los datos originales, se representan los datos reales frente a los teóricos en la figura 5.27.

$$\text{EN 1.4301 (v1): } \text{SPB} = 18,058 + 0,018 \cdot \text{Rp}_{0,2\%} - 7,459 \cdot \text{espesor} \quad (\text{ec. 5.1})$$

$$\text{EN 1.4301 (v2): } \text{SPB} = 5,273 + 0,03 \cdot \text{Rp}_{0,2\%} - 5,642 \cdot \text{espesor} \quad (\text{ec. 5.2})$$

$$\text{EN 1.4310: } \text{SPB} = 34,144 - 0,028 \cdot \text{Rp}_{0,2\%} \quad (\text{ec. 5.3})$$

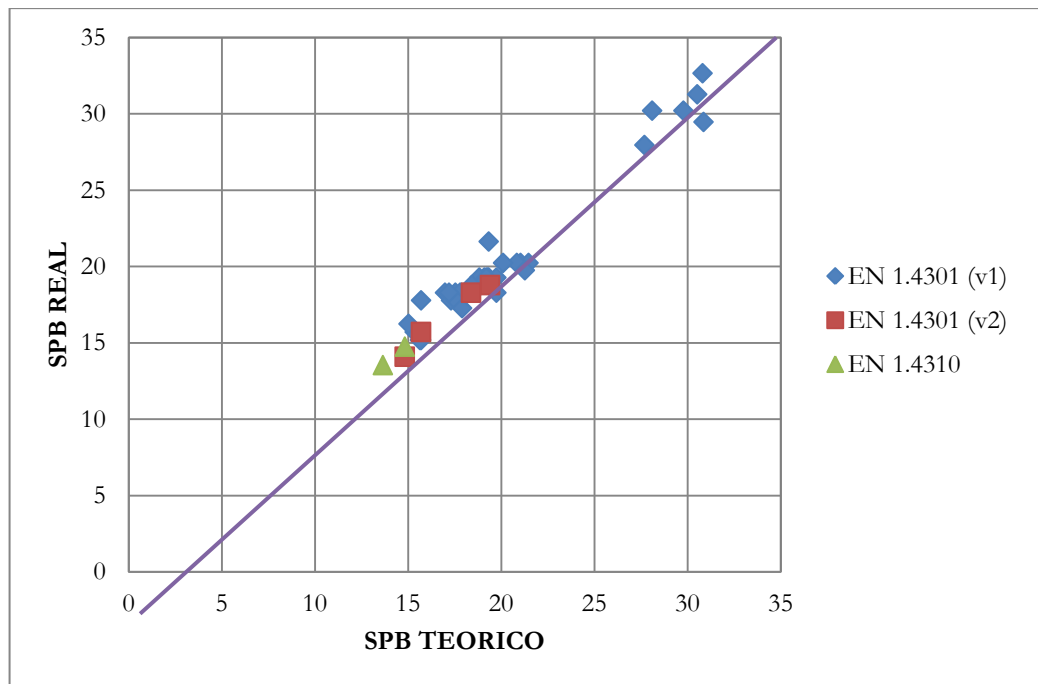


Figura 5.27.- Relación del *springback* entre el límite elástico y el espesor por tipo de acero.

En la figura 5.27 se observa que los valores de *springback* teóricos se ajustan perfectamente a los reales mediante las ecuaciones calculadas.

De esta forma, en este TFC se ha determinado que a partir de los valores del límite elástico (obtenido de forma rutinaria a partir de la máquina de tracción universal para la certificación de los materiales) y del espesor, se puede estimar la recuperación elástica de un acero austeníticos endurecido por deformación en frío.

Por último, en la figura 5.28 se evalúa la influencia del grado de endurecimiento en la recuperación elástica.

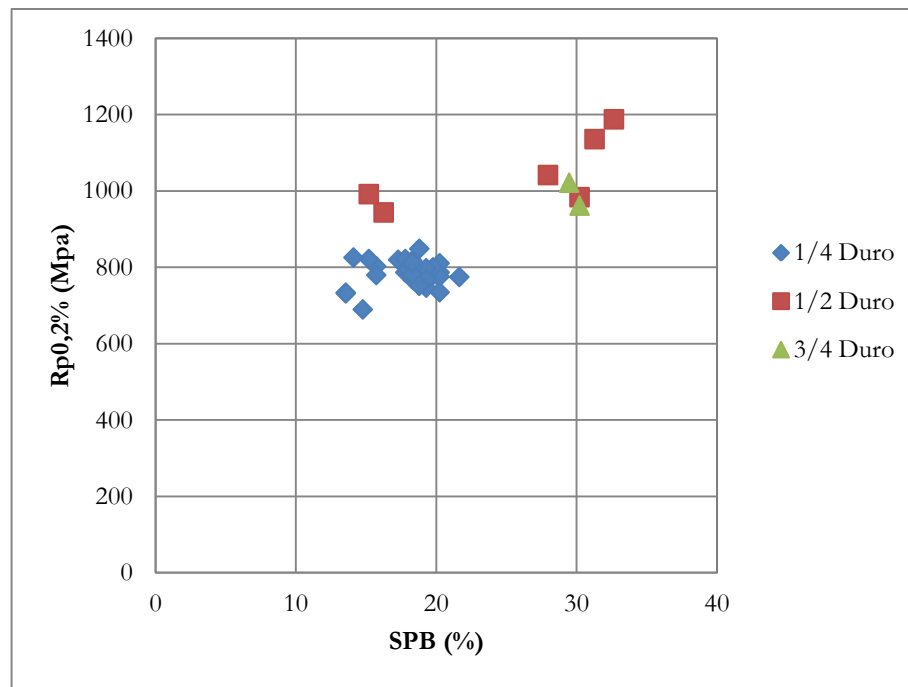


Figura 5.28.- Influencia del grado de endurecimiento en la recuperación elástica del material.

Se observa en la figura 5.28 que a mayor grado de endurecimiento, mayor límite elástico y mayor recuperación elástica.

#### **5.4. Estudio de la soldabilidad de los aceros endurecidos por deformación en frío.**

La eficacia del aumento de propiedades de los materiales endurecidos en diseños estructurales puede reducirse, al menos en parte, por el calentamiento durante el proceso de soldadura en la etapa de fabricación, tanto en el propio cordón como en la zona afectada térmicamente (HAZ), donde las temperaturas máximas son relativamente bajas para provocar la fusión, pero suficientemente altas como para causar cambios significativos en la microestructura y en las propiedades de los materiales. [33]

Para evaluar el comportamiento de los aceros inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío tras un proceso de soldadura se ha realizado a nivel experimental, un ensayo de simulación HAZ para determinar las condiciones de soldeo óptimas mediante el equipo Gleeble 1500D previo a la posterior realización de la soldadura TIG sin aporte mediante el equipo de soldadura Euromatig 35-2.

##### **5.5.1. Análisis de los resultados obtenidos tras los ensayos de simulación HAZ**

Tras la aplicación de los cuatro programas de simulación HAZ realizados en el equipo termomecánico Gleeble 1500D de la forma descrita en el punto 4.2.11 a los materiales incluidos en la tabla 4.6, se estudia la influencia de las distintas condiciones de soldeo de partida en el comportamiento de los materiales, a partir de la evaluación de los siguientes parámetros:

- Microestructura
- Tamaño de grano
- Magnetismo
- Dureza

## a) Microestructura

Para evaluar la influencia de los distintos inputs térmicos, se ha analizado la estructura de cada una de las muestras ensayadas con el microscopio Olympus GX71. Los resultados se muestran en las tablas AV.1 – AV.9 del Anexo V. Además, para poder establecer una comparación de la influencia de los distintos ciclos térmicos aplicados, se incluyen en dichas tablas la estructura del material base o de partida. A modo de ejemplo, en la tabla 5.22 se muestra una de las tablas.

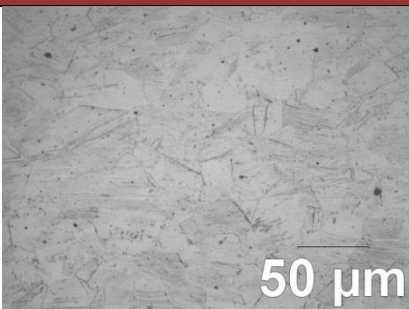
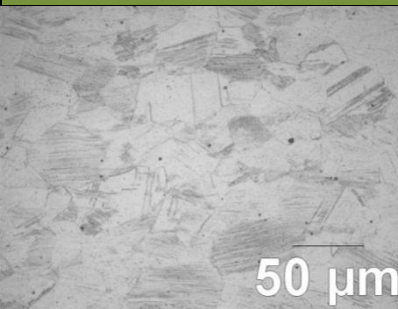

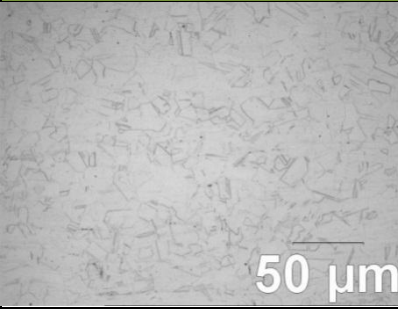
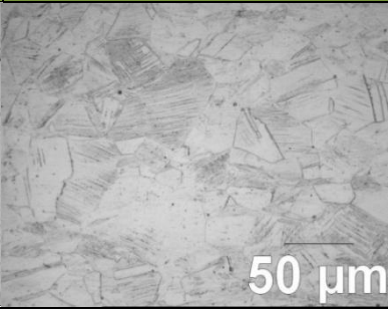
B1	
	
T <sup>a</sup> Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla 5.22.- Resultados del análisis microestructural de la muestra B1

Tras observar las distintas microestructuras resultantes (figuras AV.1-AV.9), en primer lugar cabe destacar que ninguno de los materiales muestran precipitados de carburo de cromo ni la existencia de la fase intermetálica sigma, deduciéndose que todos los programas HAZ son óptimos desde el punto de vista de la calidad microestructural.

Por otro lado, se evalúa la **influencia en la estructura de las distintas temperaturas pico** y de las distintas curvas de enfriamiento correspondientes a cada input térmico y punto desde el centro del cordón.

Por lo general, se observa que a mayor temperatura pico (HAZ 1  $\rightarrow$  IT = 12,5 kJ/cm y 7 mm) los materiales adquieren una estructura más homogénea y los granos están más recrystalizados, semejantes a los de un acabado en estado de recocido (mostrada en la figura 5.11). En el caso contrario, el programa HAZ 4 (IT = 7,2 kJ/cm y 12 mm) con una temperatura pico de 239°C, la estructura mantiene la deformación del material de partida. En cuanto a la influencia de las temperaturas picos correspondientes a los otros dos programas en el HAZ 2 donde se aprecia un cambio en el comportamiento.

A continuación se describe en detalle el análisis de la microestructura del HAZ 2 ( $T_p = 623^\circ\text{C}$ ) para ver la influencia del grado de endurecimiento, espesor y tipo de acero:

- GRUPO A (EN 1.4301\_v1):
  - A1 ( $1/2$  duro): no muestran precipitados de carburo ni de ninguna fase intermetálica indeseable. Se observan algunos granos recrystalizados, granos alargados y algunas bandas de deslizamiento.
  - A2 ( $3/4$  duro): se observa que la estructura se encuentra en un estado más deformado que la muestra A1. En esta muestra, los granos apenas están recrystalizados, son más alargados y más orientados que los de la muestra A1.



- GRUPO B (EN 1.4301\_v1):
  - B1 (1/4 duro): Los granos tienen un tamaño mayor.
  - B2 (1/2 duro): En general muestra algunas agujas de martensita (visible a 1000 aumentos) y algunas bandas de deslizamiento. Esta estructura, muestra un grado de deformación mayor que la muestra B1.
- GRUPO C:
  - C1 (EN 1.4301\_v1): Se observa la presencia de agujas de martensita.
  - C2 (EN 1.4301\_v2): Muestra una estructura muy similar al material C1, aunque los granos están más orientados.
- GRUPO D:
  - D1 (1.4301\_v1): Presenta escasas agujas finas de martensita con una estructura similar a la muestra B1.
  - D2 (1.4301\_v2): El material se encuentra en un estado un poco más recocido y con agujas más finas que la muestra D1.
- GRUPO E:
  - E1 (1.4301\_v2): A penas se observan bandas de deformación.
  - E2 (1.4310): Se observa un grano más pequeño y más deformado; y con más bandas de deslizamiento que la muestra E1.

A partir de la observación de todas las microestructuras analizadas, puede estimarse que a partir de una temperatura pico de 623 °C los granos empiezan a recrystalizar y desaparecer las bandas de deslizamiento y las agujas de martensita, presentando una estructura más homogénea y cada vez más similar a la de un acabado 2B. En cuanto al **tipo de acero**, se deduce que no existe ninguna diferencia significativa entre la aplicación de los distintos ciclos térmicos en los distintos tipos de acero evaluados (muestras de los grupos C, D y E). Por último, a menor **espesor** (mayores reducciones en la segunda laminación en frío) se observa una estructura menos homogénea.

## b) Resultados de la medida del tamaño de grano

Los resultados de la medida del tamaño de grano mediante el microscopio óptico, de los materiales tras las cuatro simulaciones HAZ son los mostrados en la tabla 5.23.

Input Térmico (kJ/cm)	Tp (°C)	TAMAÑO DE GRANO (GS)									
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2
12,5	1030	10,1	10,8	9,6	10,1	9	9,8	8,8	10,1	10,1	8,7
7,2	623	8	8	7,1	8,5	7,8	7,9	7,8	8,2	8,7	8,3
12,5	389	8,1	8	7,5	8,6	8,2	8,1	8,7	8,3	10,2	8,6
7,2	236	8,1	8,2	6,9	8,8	8	8	8,1	8,1	9	7,6
Material Base		9	11	8	9,1	8,6	7,5	7,9	8,9	9,9	8,2

Tabla 5.23.- Resultados de la medida del tamaño de grano tras la aplicación de las simulaciones

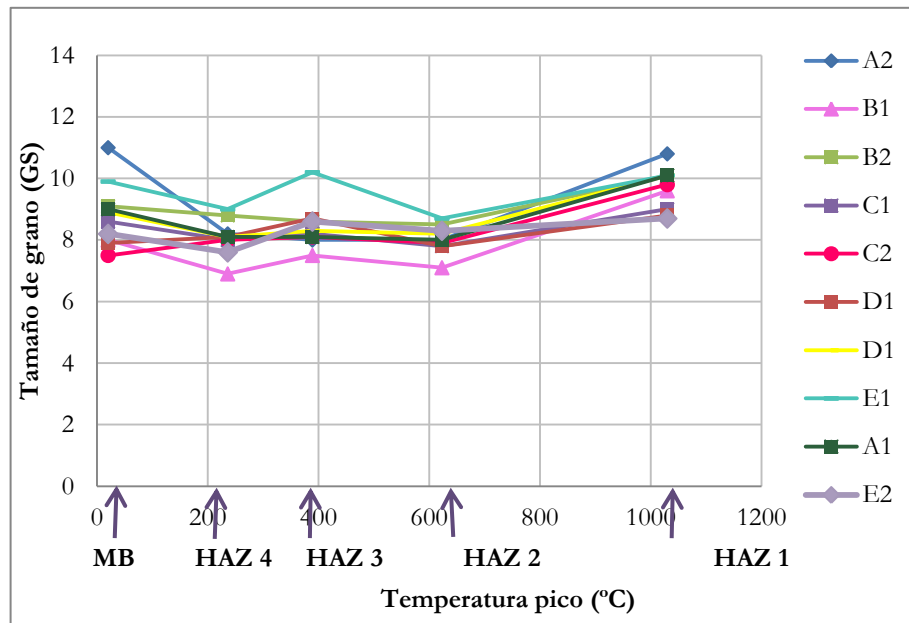


Figura 5.29.- Influencia de los distintos ciclos térmicos en el tamaño de grano

En la figura 5.29 se observa que prácticamente se mantiene el tamaño de grano hasta la temperatura 623°C, y disminuye cuando alcanza los 1000°C, deduciéndose por lo general, que a medida que aumenta la temperatura pico del programa térmico, el tamaño de grano es más fino que el del material de partida (a excepción del material

A2) al estar más recristalizado. La propia deformación genera núcleos de recristalización (martensita, bandas de deslizamiento, etc.) que después se activan con la temperatura más alta, no con las bajas. Por lo que se deduce que a mayor input térmico para un punto cercano al cordón el tamaño de grano es menor por estar menos deformado.

### c) Resultados del grado de magnetismo

La determinación del magnetismo se realiza mediante el ferritoscopio. Los resultados se muestran en la tabla 5.24.

Input Térmico (kJ/cm)	Tp (°C)	MAGNETISMO (%)									
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2
12,5	1030	0,038	0,048	0,033	0,018	0,02	0,036	0,009	0,009	0,005	0,519
7,2	623	2,615	1,355	6,641	2,845	0,334	0,959	3,454	1,534	1,385	0,97
12,5	389	1,853	3,606	6,754	2,622	0,57	1,062	3,856	1,545	1,43	1,301
7,2	236	1,541	3,247	7,164	2,944	0,494	0,84	4,299	1,37	1,72	1,808
Material Base		2,418	2,813	7,247	2,754	1,085	2,628	3,302	1,211	1,626	1,182
ACA 2B		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 5.24.- Resultados del grado de magnetismo de los materiales tras las simulaciones HAZ

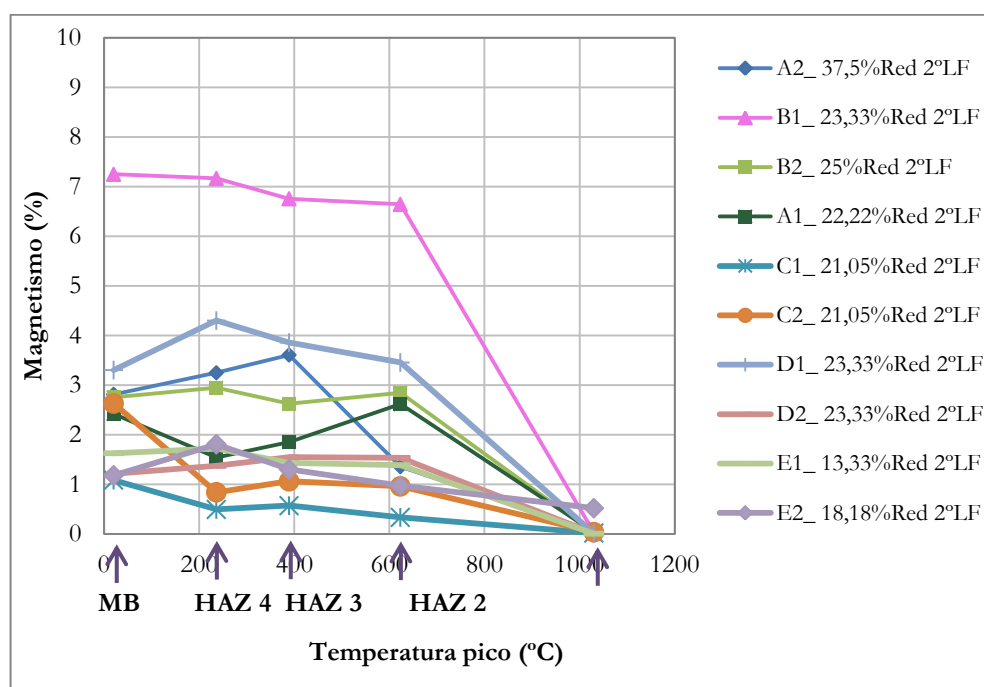


Figura 5.30.- Influencia de los distintos ciclos térmicos en el magnetismo en función de la reducción de la 2ª laminación en frío

En la figura 5.30 se observa que el programa HAZ 4 con temperatura pico de 1030°C, se ha disuelto casi por completo todas las trazas de martensita ya que apenas presenta contenido magnético. Por otro lado, los programas HAZ 1 y HAZ 2 apenas tienen influencia en la estructura por lo que presentan un grado de magnetismo similar al del material base, siendo el programa térmico HAZ 3 donde empieza a apreciarse un cambio en el grado de magnetismo respecto al material base, debido a que la martensita generada mediante la deformación en frío empieza a desaparecer a partir de los 623°C, independientemente del tipo de acero (grupos C, D y E). Se comprueba por tanto que el contenido magnético del material apenas cambia hasta que se alcanza una temperatura de 623°C, produciéndose una reducción a los 1030°C.

#### d) Resultados de la medida de la dureza

La dureza de cada uno de las muestras en estudio se ha medido mediante un durómetro Vickers, en la sección en la que estuvo soldado el termopar de control. Los resultados se muestran en la tabla 5.25.

Para establecer una comparación de la influencia del grado de endurecimiento se añade a dicha tabla los valores medios de dureza de un acabado 2B.

Input Térmico (kJ/cm)	Tp (°C)	DUREZA (HV)									
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2
12,5	1030	182	173	170	175	172	164	172	169	178	181
7,2	623	334	397	320	320	296	296	321	305	310	299
12,5	389	363	392	342	344	310	309	306	314	323	309
7,2	236	347	397	343	324	306	302	332	326	326	303
Material Base		344	365	346	346	312	295	318	295	318	295
Acabado 2B		165	161	170	170	170	159	170	154	160	160

Tabla 5.25.- Resultados de la medida de la dureza tras la aplicación de los programas HAZ

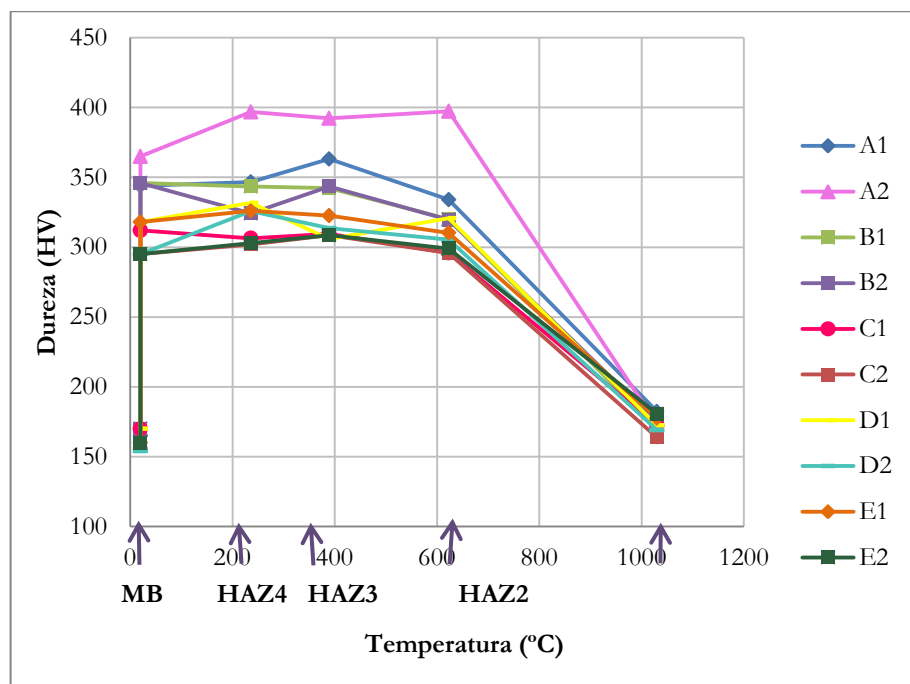


Figura 5.31.- Influencia de los distintos ciclos térmicos en la dureza de los materiales estudiados

En la figura 5.31 se observa una tendencia similar en todos los materiales en la evolución de la dureza según el ciclo térmico aplicado, con la excepción del material A2, el cual, dado su alto nivel de deformación ( $\frac{3}{4}$  duro con una reducción en la

segunda laminación en frío de 37,5%) experimenta un mayor aumento de la dureza tras los ciclos térmicos HAZ 4, HAZ 3 y HAZ2; y una fuerte disminución tras el programa HAZ 1.

Al igual que en la evaluación del magnetismo, se estima que a partir de una temperatura de 623°C el material deformado en frío empieza a sufrir ciertos cambios en sus propiedades, tendiendo a lo que es característico a un acabado 2B, produciéndose un cambio brusco respecto al material de partida cuando alcanza una temperatura de 1030°C. En cuanto al tipo de acero, no se observa ninguna diferencia significativa.

#### e) Elección de las condiciones iniciales de soldeo para la soldadura TIG

Tras la evaluación de cada una de las propiedades medidas en los puntos anteriores, se estima que todos los materiales evaluados (independientemente del tipo de acero, del espesor y del grado de endurecimiento de partida), por encima de una temperatura de 623°C empiezan a perder las características adquiridas con dicha deformación, observándose:

- El comienzo de la disolución de las agujas de martensita y de las bandas de deslizamiento de la estructura, presentando unos granos más recristalizados y más finos (mayor tamaño de grano).
- Una disminución de la dureza de los materiales.

Además, a partir de los resultados obtenidos se observa que a menor input térmico menor afectación del material de partida y mayor mantenimiento de las propiedades de los aceros endurecidos por deformación en frío. **En conclusión, el input térmico elegido para la realización de la soldadura TIG sin aporte es de 7,2 kJ/cm**, y las condiciones de soldeo son las indicadas en la tabla 5.26

Condición Soldeo	Intensidad (A)	Tensión (V)	Vel. Soldeo (cm/s)	Input (kJ/cm)
1	200	17,92	0,5	7,2

Tabla 5.26.- Condiciones iniciales de soldeo para la soldadura TIG sin aporte

### 5.5.2. Análisis de los resultados tras la realización de la soldadura TIG

El siguiente paso para estudiar la soldabilidad de los aceros endurecidos por deformación en frío, consiste en la realización de la soldadura TIG sin aporte con las condiciones de partida establecidas en la etapa anterior (tabla 5.26).

En primer lugar, se observó que las condiciones iniciales de soldeo elegidas no eran adecuadas para todos los materiales y que variaban según el espesor. Por ello tras la realización de varias pruebas previas se obtuvieron las condiciones finales de soldeo para cada material, mostradas en la tabla 4.12 del capítulo anterior.

Según la norma UNE-EN 15614-1 [60], se han comprobado el estado de la unión soldada desde el punto de vista estructural y mecánico mediante:

- Inspección visual de la soldadura.
- Análisis macroestructural y microestructural de las muestras soldadas.
- Medida del tamaño de grano de la zona afectada térmicamente (HAZ)
- Aptitud al doblado por la cara y la raíz del cordón.
- Ensayo de tracción a temperatura ambiente.
- Medida de la dureza en las distintas zonas características de la unión soldada.

Para conseguir una soldabilidad aceptable, la zona del cordón y de la HAZ deben presentar unas propiedades lo más semejantes posibles a las del material base. Aun así, cabe mencionar que difícilmente se podrán mantener las altas prestaciones de los aceros endurecidos por deformación en frío, debido a que la energía de la soldadura provoca una nueva fusión y solidificación del material, en el propio cordón, y un ablandamiento en la zona próxima al mismo.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

### a) Inspección visual de la soldadura

En primer lugar, una vez soldados todos los cupones, se realiza una inspección visual de la cara y de la raíz del cordón. En la tabla AVI.1 del Anexo VI se muestran los cordones por ambas zonas.

Tras la inspección visual, se observa que todas las soldaduras realizadas presentan unos cordones de buena calidad, es decir, tienen una buena penetración de la soldadura y no muestran ningún tipo de impureza (cascarilla, óxido, etc.)

### b) Análisis macroestructural y microestructural de las muestras soldadas.

El análisis macroestructural y microestructural de los materiales en estudio se muestran en la tabla AVI.2 del Anexo VI. El análisis macroestructural se realiza a 7 y 15 aumentos y el análisis de la microestructura se obtiene a partir de 75 y 120 aumentos, según el espesor del material. De este modo se observa en todas las muestras 3 zonas bien diferenciadas: zona del cordón, zona afectada térmicamente (HAZ) y zona del material base.

El **cordón** está formado por una matriz austenítica y por dentritas de ferrita delta orientadas según el gradiente térmico; además al estar esta zona a temperaturas altas de fusión, el material se funde y solidifica de nuevo generándose una estructura as cast tras el enfriamiento.

La **HAZ** es variable según el espesor. Los espesores finos presentan un ancho de la HAZ mayor que los espesores más gruesos. Los resultados del análisis de la microestructura de los materiales estudiados son:

- GRUPO A (EN 1.4301\_v1):
  - A1 (1/2 duro): presenta un ancho de la HAZ uniforme a lo largo de todo el espesor.
  - A2 (3/4 duro): se observa una estructura muy similar que la muestra A1.



- GRUPO B (EN 1.4301\_v1):
  - B1 ( $\frac{1}{4}$  duro): Se observa que el ancho de la HAZ es mayor en la zona próxima a la raíz y a la cara, estrechándose considerablemente en el centro de la probeta.
  - B2 ( $\frac{1}{2}$  duro): El ancho de la HAZ es uniforme en todo el espesor. Además, se aprecian algunas bandas de deslizamiento y un grano con un estado de recocido superior a la B1.
- GRUPO D:
  - D1 (1.4301\_v1): la estructura presenta un ancho de la HAZ uniforme. Los granos están recristalizados aunque se encuentran algunas bandas de deslizamiento en algunas zonas.
  - D2 (1.4301\_v2): Muestra una variación del ancho de la HAZ entre la zona central y los extremos.
- GRUPO E:
  - E1 (1.4301\_v2): se observa un estado de la estructura similar al de la muestra D1, con granos recristalizados y algunas trazas de martensita.
  - E2 (1.4310): se observa un grano más deformado que la muestra E2 y presenta un ancho de HAZ uniforme.

La **zona del material base** no presenta ningún cambio en la estructura respecto al material de partida.

Por último, uno de los efectos indeseables más comunes de los aceros austeníticos es el fenómeno de sensibilización. Tras este análisis, no se ha observado ningún precipitado de carburo de cromo, por lo que ningún material ha experimentado este fenómeno.

### c) Resultados de la medida del tamaño en la zona afectada térmicamente

Para establecer una comparativa para evaluar la influencia de la afectación térmica en el tamaño de grano de la estructura se añaden los valores obtenidos del material base o de partida. Ambos resultados se muestran en la tabla 5.27.

	TAMAÑO DE GRANO							
	A1	A2	B1	B2	D1	D2	E1	E2
<b>HAZ</b>	7,1	8,1	7,7	6,6	6,9	6,7	6,8	8,2
<b>MATERIAL BASE</b>	9	11	8	9,1	7,9	8,9	9,9	8,2

*Tabla 5.27.- Resultados de la medida del tamaño de grano de la HAZ de las muestras soldadas con TIG.*

En la tabla 5.27 se observa que el grano del material soldado es más grueso que el del material base probablemente debido a la mayor temperatura a la que ha estado expuesta la estructura.

### d) Aptitud al doblado

Para la evaluación de la aptitud al doblado se ha realizado el ensayo de doblado a 180° para un radio de doblado de ½ el espesor por la cara y la raíz del cordón. Los resultados se muestran en la tabla 5.28.

	Doblado							
	A1	A2	B1	B2	D1	D2	E1	E2
<b>Cara</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>Raíz</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto

*Tabla 5.28.- Resultados de la aptitud al doblado a 180°*

Tras el análisis de los resultados, se observa que todas las uniones son adecuadas para operaciones de doblado a 180°.

## e) Resultados del ensayo de tracción a temperatura ambiente.

Para la evaluación de las prestaciones mecánicas de la unión soldada, se han realizado los ensayos de tracción a temperatura ambiente de las dos probetas ( $T_1$  y  $T_2$ ) exigidas por la norma UNE-EN 15614-1 según se indicaba en el esquema de la figura 4.21, para obtener los valores de resistencia a la tracción y del límite elástico. Además, en este caso, resulta interesante obtener el valor de la fuerza máxima de aguante del material antes de la rotura y conocer por cuál de las tres zonas posibles ha roto el material (W: zona del cordón o soldadura, W/HAZ: zona intermedia entre el cordón y la HAZ; y HAZ: zona afectada térmicamente). En la tabla 5.29 se muestran los resultados obtenidos. Para establecer una comparación entre los resultados obtenidos se incorpora en dicha tabla los resultados obtenidos de los materiales base (MB) y los valores medios habituales de un acabado 2B.

		A1	A2	B1	B2	D1	D2	E1	E2
<b>R<sub>m</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>MB</b>	1042	1239	1030	944	978	923	941	908
	<b>T<sub>1</sub></b>	628	597	747	735	739	699	701	772
	<b>T<sub>2</sub></b>	640	624	734	719	714	709	728	754
	<b>2B</b>	644	648	647	647	647	634	626	640
<b>R<sub>p0.2%</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>MB</b>	848	1022	803	826	822	780	826	734
	<b>T<sub>1</sub></b>	410	400	431	443	428	433	456	470
	<b>T<sub>2</sub></b>	426	425	423	440	429	433	450	469
	<b>2B</b>	295	294	321	321	321	301	280	300
<b>F<sub>máx</sub></b> <b>(N)</b>	<b>MB</b>	8.847	12.080	29.839	28.905	28.518	26.499	30.385	29.782
	<b>T<sub>1</sub></b>	5.194	4.543	43.565	44.372	42.847	39.787	47.471	49.856
	<b>T<sub>2</sub></b>	5.197	4.705	42.866	43.356	41.355	40.682	49.344	48.761
<b>Zona de rotura</b>	<b>T<sub>1</sub></b>	W	W	W	W/HAZ	W/HAZ	W/HAZ	W	W/HAZ
	<b>T<sub>2</sub></b>	W	W	W	W	W/HAZ	W/HAZ	W/HAZ	W/HAZ

Tabla 5.29.- Resultados del ensayo de tracción a temperatura ambiente de las muestras soldadas con TIG sin aporte.

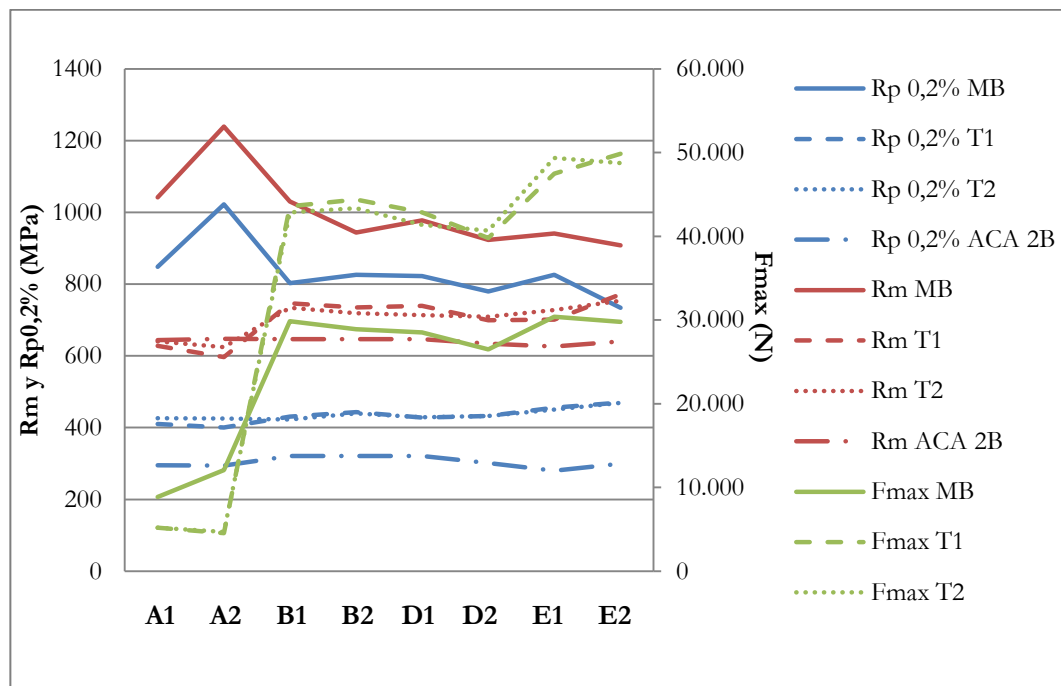


Figura 5.32.- Relación de los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas del material base, del material soldado y de un acabado 2B

A partir de la figura 5.32 se observa que los resultados de las dos probetas ( $T_1$  y  $T_2$ ) tienen un comportamiento similar, lo que confirma la repetitividad de los resultados. Los resultados de resistencia a la tracción y de límite elástico de los materiales soldados presentan una evidente caída frente a las propiedades mecánicas de los materiales de partida, aproximándose a un acabado 2B.

Por otra parte, la rotura de las probetas se ha producido en el propio cordón de soldadura o en la zona intermedia entre el cordón y a la HAZ. Cuando se suelda un material recocido, tipo 2B, se considera que la rotura por el cordón es un resultado negativo, ya que indicaría que la soldadura es más débil que el material base. No obstante, si la carga de rotura es similar en los dos casos (W y BM), se considera que la rotura puede producirse por cualquier punto, incluido el propio cordón, como ocurre en este caso, por lo que la rotura por el cordón se justifica por la menor resistencia que presenta un material endurecido respecto al material base.

**f) Medida de la dureza en las distintas zonas características de la unión soldada.**

Para ver la evolución de la variación de la dureza en las distintas zonas de la unión soldada, a continuación, en la tabla 5.30 se muestran los resultados de la medida de dureza en las distintas zonas, tal como se muestra en la figura 5.33. Además, se incluyen los valores de dureza obtenidos en los materiales de partida evaluados antes de la realización de la soldadura TIG y los valores medio de dureza para un acabado 2B.

ID	DUREZA							
	ACA 2B	MATERIAL SOLDADO						
		MB	HAZ	Cordón			HAZ	MB
A1	165	341	177	187	189	188	181	340
A2	161	377	184	191	191	189	178	380
B1	170	335	210	225	227	235	189	361
B2	170	329	182	189	192	189	194	324
D1	170	331	195	198	180	189	196	340
D2	154	326	182	191	190	203	204	327
E1	160	306	187	191	209	200	201	308
E2	160	320	200	197	192	187	194	313

*Tabla 5.30.- Resultados de la medida de dureza en las distintas zonas características de las muestras soldadas con TIG.*

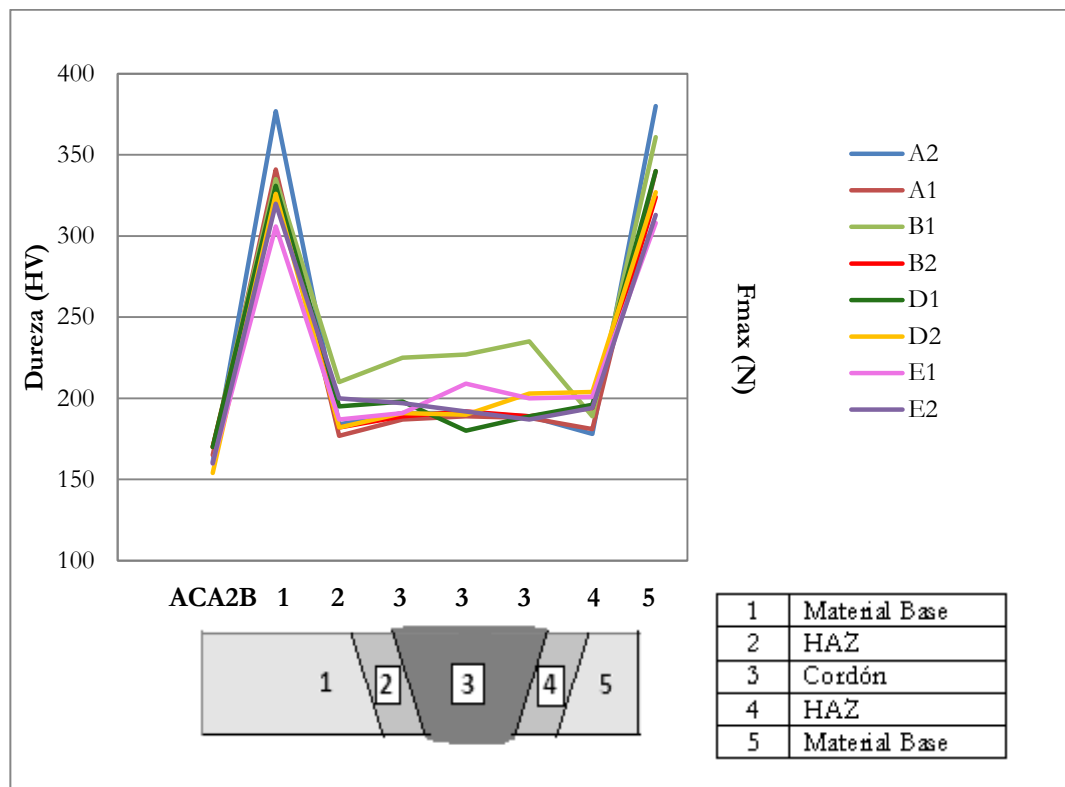


Figura 5.33.- Relación de los resultados de la medida de dureza de los acabados 2B y las distintas zonas del material soldado.

En la figura 5.33 se observa un ablandamiento constante en la zona de la soldadura respecto al alto nivel de endurecimiento de partida del material base, no existiendo una diferencia significativa del nivel de dureza en esta zona entre los distintos grados de endurecimiento (a excepción de la muestra B1).

#### g) Análisis final de los resultados obtenidos tras la aplicación de los ensayos

Tras el análisis del estudio completo se observa que se han conseguido soldaduras de buena calidad desde el punto de vista visual y microestructural, exentas de precipitados perjudiciales y de sensibilización. Por otro lado, desde el punto de vista de propiedades mecánicas finales, hubiera sido deseable una pérdida de resistencia mecánica menos acusada.

Respecto a esto último, se puede deducir que este fenómeno no depende del grado de endurecimiento inicial, ya que se observan en las gráficas 5.27 y 5.28 propiedades ( $R_{p0.2\%}$ ,  $R_m$  y dureza) relativamente similares independientemente del grado de endurecimiento, espesor y tipo de acero.

# **CAPÍTULO 6**

---

## **CONCLUSIONES**



## CAPITULO 6.- CONCLUSIONES

Este TFC se enmarca en el programa general de desarrollo de producto e investigación de nuevas aplicaciones de la empresa Acerinox Europa S.A.U., concretamente en este caso, en el de mejora de la producción y propiedades finales de los inoxidables austeníticos endurecidos por deformación en frío, y su adaptación a la normativa para usos estructurales que se está preparando a nivel europeo en la actualidad.

En este marco, el presente TFC ha proporcionado los resultados, dentro de las necesarias limitaciones de alcance y tiempo, a partir del desarrollo de los siguientes puntos:

- La actualización de los requisitos y especificaciones exigidos por la normativa vigente para usos generales y futura para aplicaciones de uso estructural en Europa (Eurocódigo 3).
- La relación entre las principales variables del proceso de producción de aceros inoxidables austeníticos trabajados en frío y la microestructura resultante, así como la influencia de ambas sobre las propiedades del acero en estado de suministro.
- El estudio del comportamiento de los aceros endurecidos por deformación en frío en operaciones de conformado y de soldaduras.

### 6.1. Conclusiones y discusión final de los resultados

1. En la revisión de la norma europea que establece las características de los aceros inoxidables para usos generales (EN 10.088), se ha comprobado que existe una limitación importante en relación con las propiedades mecánicas del material templado por deformación en frío. Dicha limitación se refiere a que tanto límite elástico como resistencia a la tracción se tratan de forma independiente, hecho que entra en conflicto con las especificaciones de la norma europea de diseño estructural Eurocódigo 3 que se está desarrollando en la actualidad. A través de distintos

requerimientos, esta nueva norma exige al inoxidable un balance de propiedades que requiere cambios en el estándar de producción de los inoxidables, en especial de los austeníticos endurecidos por laminación en frío. Con este planteamiento, se ha desarrollado:

- a) Un estudio de las propiedades mecánicas básicas del tipo de acero endurecido por deformación en frío EN 1.4301, mediante una población de 897 casos a partir de la base de datos de Acerinox Europa S.A.U desde el año 2005, donde:
  - Se ha comprobado que los aceros endurecidos por deformación en frío estudiados en este TFC **cumplen los criterios de ductilidad exigidos por la norma UNE EN 1993-1-1, por tanto son adecuados para el uso en aplicaciones estructurales.**
  - Se han agrupado los datos de propiedades mecánicas bajo el criterio de la norma de diseño estructural UNE EN 1993-1-4 (dependencia de límite elástico y resistencia a la tracción). Esto supone un avance en la generación y ordenación de los datos que serán necesarios para definir los rangos de dichos parámetros en la versión definitiva de la citada norma, actualmente en desarrollo. En este sentido, la contribución del TFC se basa en la propia **relación simultánea de límite elástico y resistencia a la tracción, y en haber generado estos datos relativos a tipos de acero y grados de endurecimiento distintos.**
- b) La influencia de la dirección del sentido de laminación en los valores de resistencia mecánica y de límite elástico a partir de 41 muestras seleccionadas para este TFC formadas por tres tipos de aceros austeníticos, con tres grados de endurecimiento y distintos espesores, observándose que **no existe una pérdida significativa de la resistencia mecánica entre la dirección de laminación.**

2. Para comprobar en detalle el conjunto de propiedades y características de los aceros endurecidos por deformación, se han seleccionado para este TFC 41 muestras de tres tipos de aceros austeníticos con tres grados de endurecimiento y distintos

espesores. A partir de los resultados obtenidos se han establecido las siguientes conclusiones:

- a) **Se ha verificado que, con independencia del tipo de acero, las propiedades mecánicas dependen del grado de endurecimiento** que se aplica en el proceso de fabricación, donde a mayor grado de endurecimiento, mayor resistencia mecánica y dureza, y menor alargamiento presenta el material.
- b) Dada la relación entre el contenido de martensita generada por la deformación en frío y la medición magnética, **se ha determinado la relación cuantitativa entre reducción de espesor y contenido de martensita**. Esta relación permite la estimación de las propiedades mecánicas finales que la aplicación de esa reducción proporcional al material.
- c) De la comparación entre las propiedades mecánicas básicas de los acabados endurecidos y 2B (recocido), se determina que, independientemente del tipo de acero y en función del espesor y del grado de endurecimiento, **los materiales endurecidos presentan unos valores de resistencia mecánica y dureza del orden del doble y un alargamiento 5 veces menor que un acabado 2B**. Los valores de rugosidad media de ambos acabados son similares, por lo que se concluye que ni la cantidad de deformación ni el propio proceso de endurecimiento influyen significativamente en el acabado superficial.
- d) Tras el estudio del comportamiento de los aceros endurecidos por deformación en frío en operaciones de conformado:
  - Se ha encontrado que **a mayor grado de endurecimiento, el material va perdiendo su aptitud al doblado**, sobre todo en los casos de los espesores más finos. No obstante, **todos los materiales estudiados son aptos a operaciones de doblado con un ángulo inferior a 135° para un radio de doblado  $\frac{1}{2}$  el espesor**.
  - Se establece que a mayor grado de endurecimiento, menor capacidad de embutición debido al elevado nivel de resistencia mecánica y menor ductilidad. Los resultados de anisotropía media muestran que **los**

**materiales endurecidos por deformación en frío no presentan buenas cualidades para operaciones de embutición**, aunque esto en sí no es un problema teniendo en cuenta que el tipo de aplicación mayoritaria de estos materiales es la estructural.

- **Todos los materiales trabajados en frío estudiados presentan una mayor tendencia a endurecerse en operaciones de estirado cuanto mayor es el grado de endurecimiento**, sobre todo en los casos de los espesores más finos. Esto se deduce a partir de que a mayor valor de exponente de endurecimiento y de resistencia a la tracción, mayor nivel de dureza, además de observarse una pérdida significativa de ductilidad y menor estirado hasta rotura (menor índice Erichsen).
- e) El estudio de la soldabilidad realizado a una selección de 10 materiales de las 41 muestras estudiadas, ha permitido establecer una comparación entre los tres tipos de acero, los tres grados de endurecimiento y los distintos espesores, deduciéndose las siguientes conclusiones:
- En primer lugar, a partir de ensayos de simulación de la HAZ se determinaron las condiciones de soldeo iniciales para la realización de la soldadura TIG, donde **a menor input térmico se producen menos pérdidas de las características mecánicas, independientemente del tipo de material y del grado de endurecimiento**. Además, en este TFC se ha encontrado que **a temperaturas superiores a 623°C, la martensita generada por la deformación en frío comienza a revertirse en austenita y cuando el material alcanza una temperatura de 1030°C, presenta unas propiedades similares a las de un acabado 2B**.
  - La determinación de **las condiciones de soldeo más adecuadas para la realización de la soldadura TIG sin aporte varían en función del espesor de forma independiente** al grado de deformación y tipo de acero, donde a menor espesor menor input térmico requiere.
  - Tras verificar **la calidad de la unión soldada con TIG sin aporte**, se observa que aunque se haya conseguido una soldadura de buena calidad a

nivel visual y estructural, los aceros endurecidos por deformación en frío **experimentan un fuerte ablandamiento en la zona de la soldadura**, presentando unas propiedades semejantes a las de un acabado 2B. Además, se ha observado que **las propiedades mecánicas resultantes en el material soldado no dependen del grado de endurecimiento de partida**, ya que se observa que las propiedades finales de los materiales soldados son similares.

## 6.2. Conclusiones finales

En resumen, es posible concluir que se han cumplido con los objetivos de la propuesta de este TFC. De forma que en primer lugar, se entregarán los resultados obtenidos en este TFC por parte de Acerinox Europa S.A.U. al Grupo de Evolución del Eurocódigo 3, para ser tenidos en cuenta en la próxima revisión de la norma UNE EN 1993-1-4.

De forma que, las relaciones establecidas a partir de los resultados conseguidos serán facilitadas al Departamento Técnico con el objetivo de optimizar el proceso de fabricación de los aceros endurecidos por deformación en frío por parte de Acerinox Europa S.A.U.

Gracias a las relaciones establecidas a partir del estudio de conformabilidad es posible estimar las características de los aceros endurecidos por deformación en frío en operaciones de conformado a partir de las condiciones de fabricación y de las propiedades mecánicas básicas obtenidas de forma rutinaria.

En cuanto a la soldabilidad de los aceros trabajados en frío, si bien se han conseguido soldaduras de buena calidad desde el punto de vista visual y microestructural, hubiera sido deseable una pérdida de resistencia mecánica menos acusada. Por ello cabe plantear, fuera de este TFC, pruebas futuras de soldeo, en el que se intenten definir condiciones de soldeo aún mejores para los aceros austeníticos endurecidos.

Por último, indicar que los resultados sobre las prestaciones y el comportamiento de estos materiales en operaciones de conformado y soldadura, se van a poner a disposición de los clientes de Acerinox Europa S.A.U. a través de la red comercial de la compañía, con objeto de mejorar el conocimiento acerca del manejo de estos aceros y, en definitiva, la calidad global del producto acabado.

Para concluir, indicar que los resultados de este TFC se presentarán en el congreso internacional *European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes* (EUROMAT 2013), cuyo resumen titulado “*Cold-worked austenitic stainless steels for structural applications: range of properties and manufacturing operations behavior*”, ya ha sido aceptado por el comité de expertos, al que se le ha asignado el número 2350.

## **ANEXO I**

---

### **RESULTADOS COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS ENDURECIDOS**

## ANEXO I.- RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS ENDURECIDOS

### a) EN 1.4301 (v1)

ACERO	ESP (mm)	C	Cr	Cu	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si
<b>¼ Duro</b>											
1A	1,5	0,041	17,648	0,343	1,717	0,338	0,055	8,081	0,035	0,005	0,369
1B		0,049	17,676	0,31	1,707	0,256	0,059	8,129	0,036	0,006	0,283
1C		0,049	17,676	0,31	1,707	0,256	0,059	8,129	0,036	0,006	0,283
1D		0,049	17,676	0,31	1,707	0,256	0,059	8,129	0,036	0,006	0,283
1E		0,053	17,619	0,385	1,706	0,203	0,055	8,092	0,03	0,005	0,363
2A	1,7	0,041	17,648	0,343	1,717	0,338	0,055	8,081	0,035	0,005	0,369
2B		0,041	17,648	0,343	1,717	0,338	0,055	8,081	0,035	0,005	0,369
2C		0,041	17,648	0,343	1,717	0,338	0,055	8,081	0,035	0,005	0,369
2D		0,044	17,63	0,33	1,71	0,23	0,058	8,068	0,032	0,004	0,412
2E		0,037	17,674	0,333	1,574	0,254	0,044	8,062	0,033	0,002	0,376
2F		0,048	17,843	0,288	1,751	0,304	0,058	8,049	0,035	0,006	0,366
2G		0,054	17,636	0,293	1,641	0,282	0,051	8,037	0,034	0,002	0,34
2H		0,054	17,636	0,293	1,641	0,282	0,051	8,037	0,034	0,002	0,34
2I		0,041	17,69	0,101	1,731	0,076	0,052	8,096	0,029	0,003	0,328
3A	2,0	0,044	17,61	0,351	1,69	0,299	0,043	8,016	0,033	0,003	0,371
3B		0,048	17,75	0,375	1,714	0,293	0,051	8,03	0,033	0,005	0,382
3C		0,048	17,843	0,288	1,751	0,304	0,058	8,049	0,035	0,006	0,366
3D		0,054	17,646	0,301	1,74	0,222	0,061	8,075	0,034	0,003	0,332
3E		0,049	17,676	0,31	1,707	0,256	0,059	8,129	0,036	0,006	0,283
3F		0,048	17,843	0,288	1,751	0,304	0,058	8,049	0,035	0,006	0,366
3G		0,041	17,566	0,37	1,667	0,29	0,052	8,02	0,033	0,004	0,378
3H		0,041	17,566	0,37	1,667	0,29	0,052	8,02	0,033	0,004	0,378
3I		0,049	17,721	0,406	1,69	0,293	0,046	8,094	0,036	0,005	0,334
4A	2,3	0,037	17,674	0,333	1,574	0,254	0,044	8,062	0,033	0,002	0,376
4B		0,046	17,592	0,105	1,712	0,079	0,049	8,047	0,027	0,004	0,342
4C		0,046	17,592	0,105	1,712	0,079	0,049	8,047	0,027	0,004	0,342



½ Duro											
10A	0,6	0,048	17,613	0,105	1,694	0,11	0,052	8,045	0,03	0,005	0,336
10B		0,047	17,787	0,433	1,697	0,336	0,054	8,087	0,035	0,003	0,306
11A	0,7	0,06	17,69	0,321	1,669	0,297	0,057	8,055	0,035	0,006	0,361
11B		0,045	17,785	0,276	1,622	0,224	0,055	8,025	0,033	0,004	0,352
12A	2,4	0,048	17,724	0,362	1,604	0,236	0,048	8,024	0,033	0,002	0,281
12B		0,048	17,724	0,362	1,604	0,236	0,048	8,024	0,033	0,002	0,281
¾ Duro											
13A	0,75	0,044	17,673	0,368	1,694	0,402	0,056	8,062	0,033	0,002	0,333
13B		0,046	17,709	0,422	1,657	0,42	0,046	8,149	0,034	0,001	0,336

Tabla AI.1.- Composición química del EN 1.4301 (v1)

## b) EN 1.4301 (v2)

ACERO	ESP (mm)	C	Cr	Cu	Mn	Mo	N	Ni	P	Si	S
$\frac{1}{4}$ Duro											
5	1,5	0,038	17,681	0,498	1,213	0,146	0,05	8,349	0,03	0,001	0,364
6	2,0	0,033	17,761	0,517	1,158	0,257	0,051	8,309	0,031	0,002	0,348
7	2,3	0,03	17,63	0,491	1,219	0,284	0,051	8,344	0,035	0,002	0,351
8	2,7	0,025	17,628	0,35	1,677	0,392	0,08	8,014	0,034	0,002	0,332

Tabla AI.2.- Composición química del EN 1.4301 (v2)

## c) EN 1.4310

ACERO	ESP (mm)	C	Cr	Cu	Mn	Mo	N	Ni	P	Si	S
$\frac{1}{4}$ Duro											
9A	2,6	0,045	18,102	0,59	1,861	0,178	0,079	6,901	0,035	0,002	0,394
9B		0,027	17,426	0,577	1,509	0,266	0,139	6,596	0,03	0,001	0,39
9C		0,02	17,485	0,592	1,531	0,087	0,127	6,585	0,03	0,002	0,32

Tabla AI.3.- Composición química del EN 1.4310

## **ANEXO II**

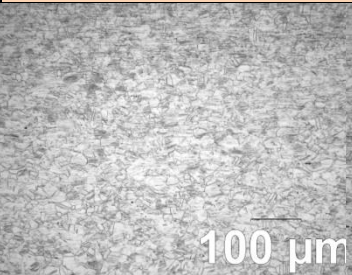
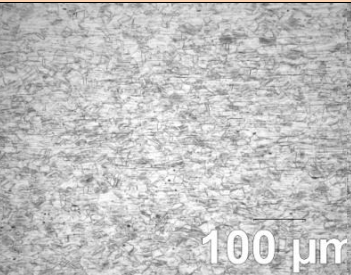
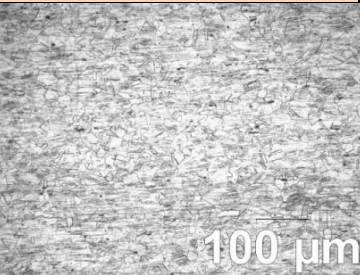
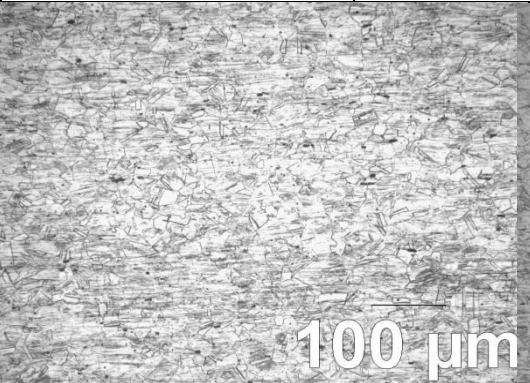
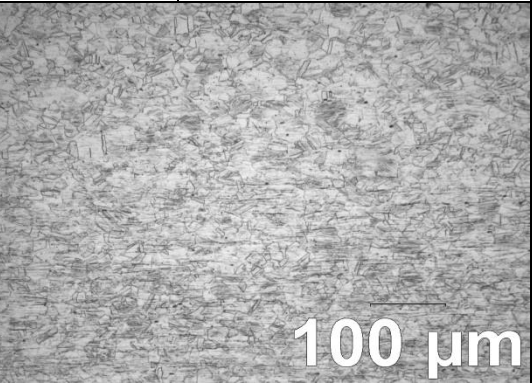
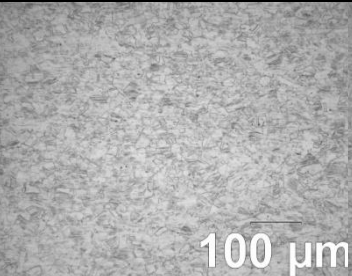
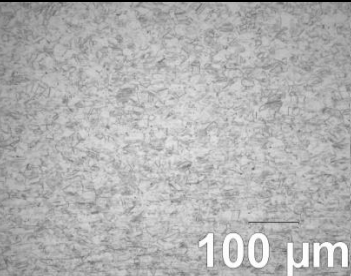
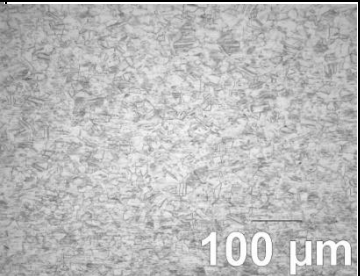
---

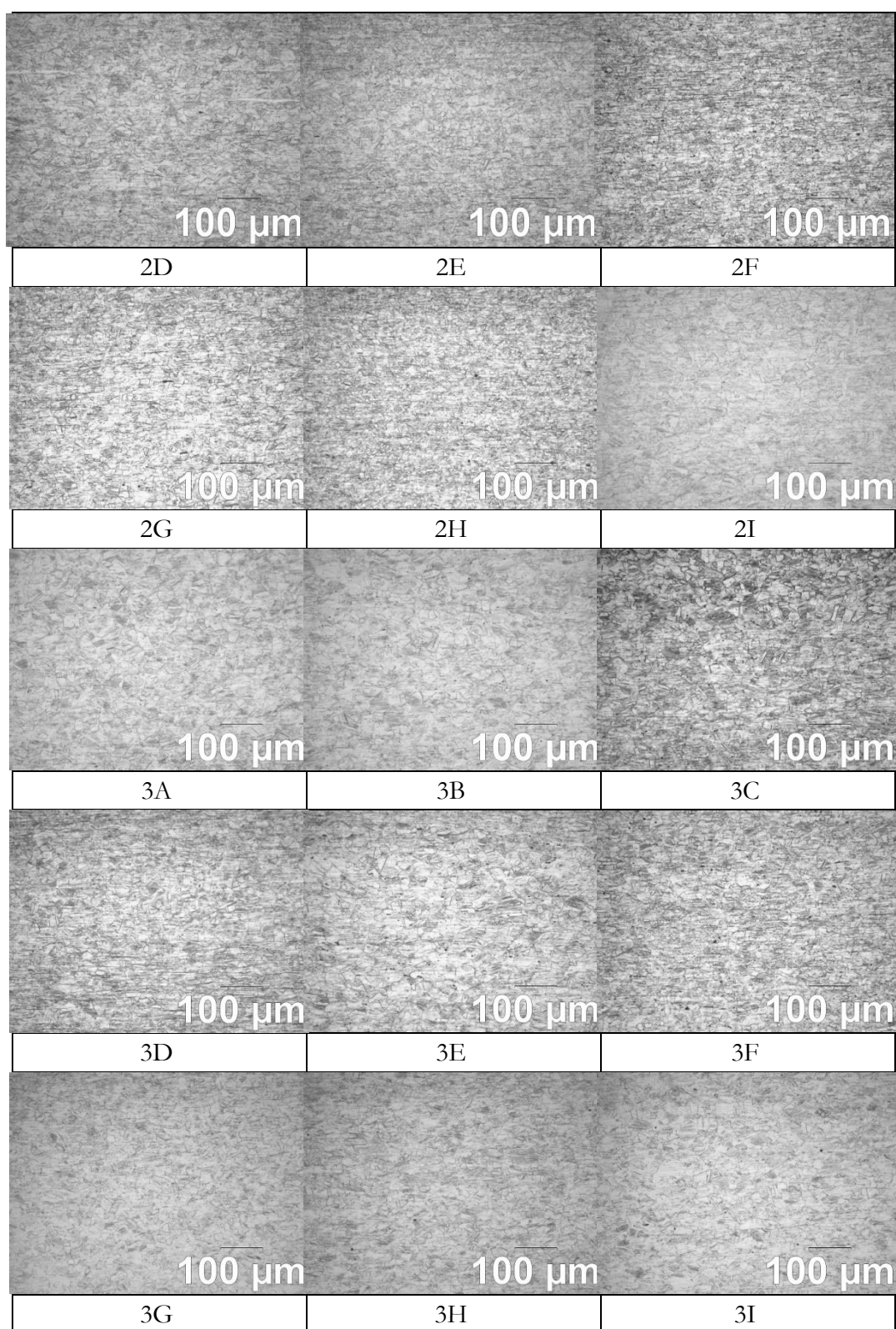
### **RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS ENDURECIDOS**

ANEXO II.- RESULTADOS ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LOS ACEROS ENDURECIDOS

El análisis de las microestructuras de todos los materiales seleccionados se muestra en las siguientes tablas.

a) Grado de endurecimiento ¼ duro

1.4310		
		
1 <sup>a</sup>	1B	1C
		
1D	1E	
		
2A	2B	2C





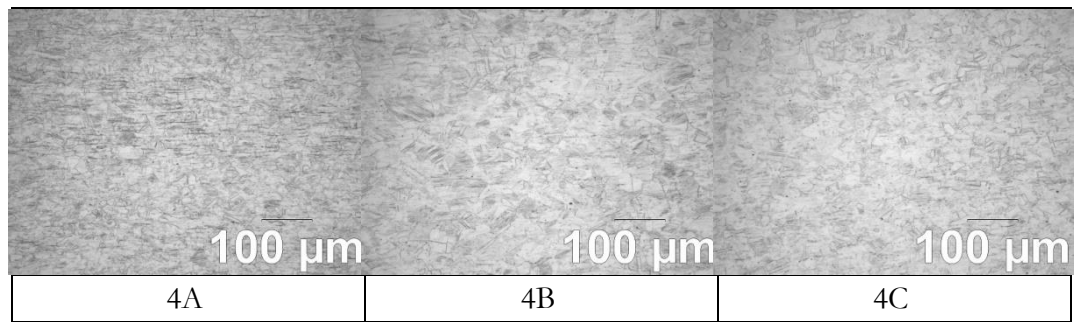


Tabla AII.1.- Resultados de las microestructuras EN 1.4301 (v1)  $\frac{1}{4}$  duro.

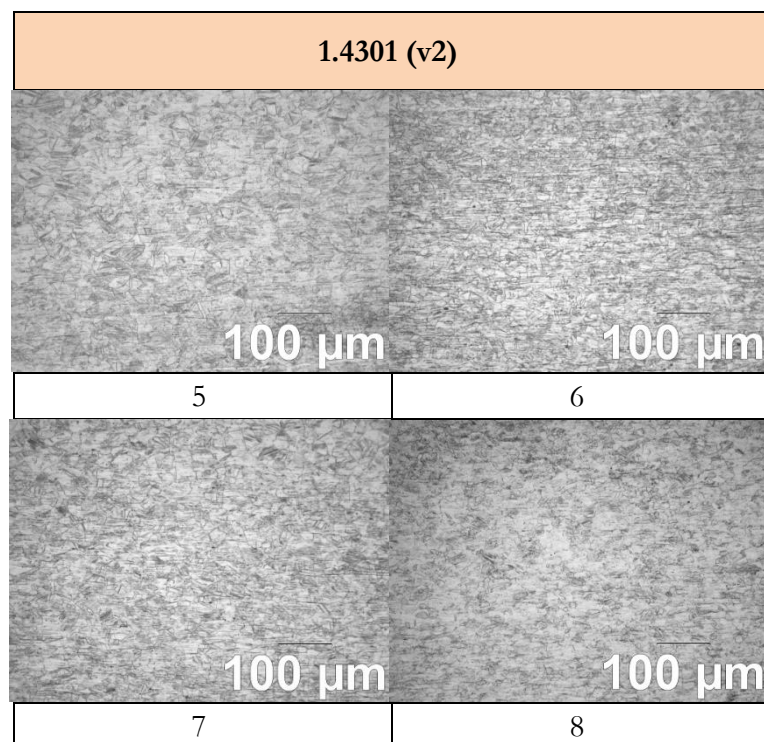


Tabla AII.2.- Resultados de las microestructuras EN 1.4301 (v2)  $\frac{1}{4}$  duro.

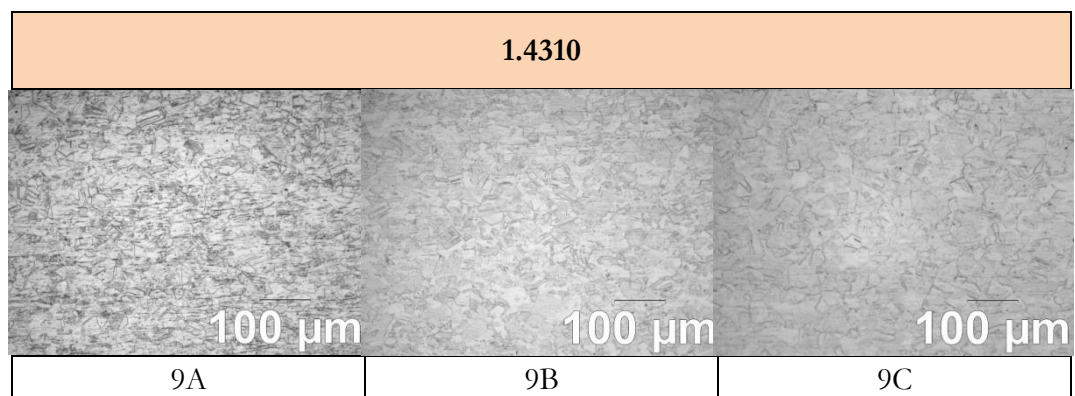


Tabla AII.3.- Resultados de las microestructuras EN 1.4310  $\frac{1}{4}$  duro.

b) Grado de endurecimiento ½ duro

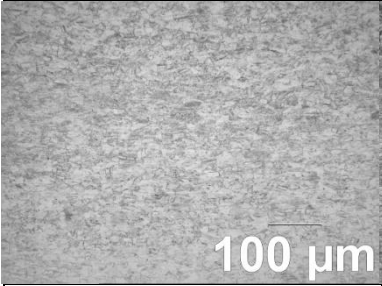
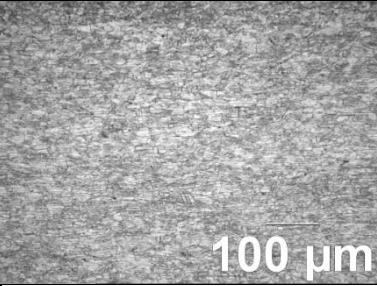
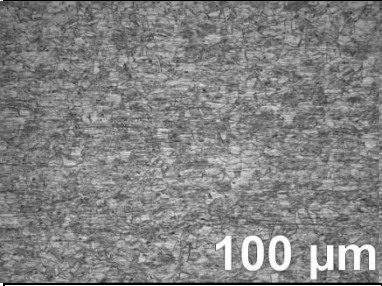
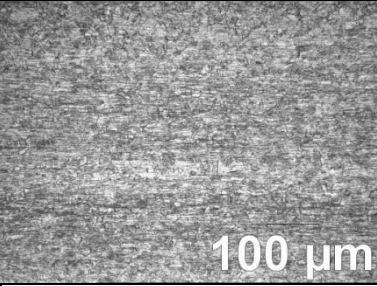
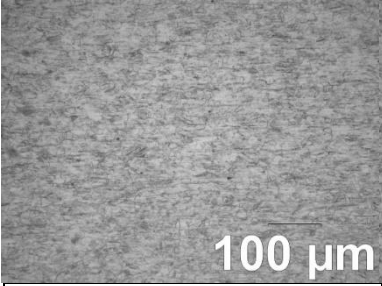
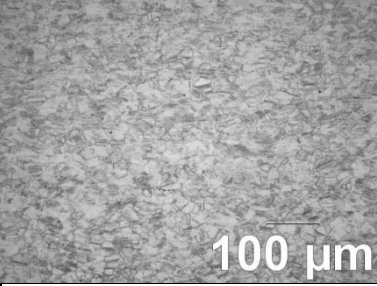
1.4301 (v2)	
	
10A	10B
	
11A	11B
	
12A	12B

Tabla AII.4.- Resultados de las microestructuras EN 1.4301 (v1) ½ duro.

c) Grado de endurecimiento  $\frac{3}{4}$  duro

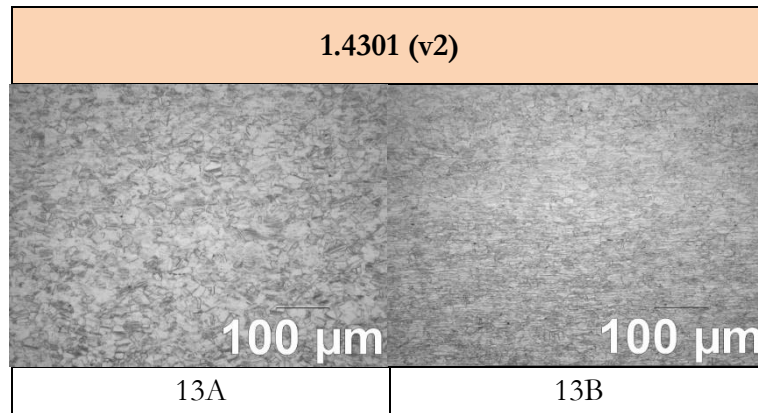


Tabla AII.5.- Resultados de las microestructuras EN 1.4301 (v1)  $\frac{3}{4}$  duro.

## **ANEXO III**

---

### **RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS ENDURECIDOS**



### ANEXO III.- RESULTADOS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS ENDURECIDOS EN LAS TRES DIRECCIONES AL SENTIDO DE LAMINACIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras el ensayo de tracción a medio ambiente en las tres direcciones al sentido de laminación (L: longitudinal o a 0°, D: Diagonal o a 45° y T: transversal o a 90°) para todos los materiales seleccionados

#### a) Grado de endurecimiento ¼ duro

1.4301 (v1)								
ID	Espesor (mm)	Orientación	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	n	r
1A	1,5	L	920	844	24,42	312	0,105	0,528
		D	919	807	15,53		0,070	-
		T	928	787	21,06		0,091	-
1B		L	932	831	24,30	320	0,099	0,793
		D	934	849	10,58		-	-
		T	968	811	11,51		-	-
1C		L	909	792	25,78	308	0,124	0,418
		D	880	767	21,01		0,094	-
		T	915	776	22,08		0,102	0,753
1D		L	873	769	26,58	292	0,119	0,602
		D	868	757	22,31		0,095	0,715
		T	890	735	23,50		0,104	0,871
1E		L	974	812	23,76	325	0,129	0,599
		D	954	829	15,69		0,079	-
		T	976	800	19,26		0,104	1,041
2A	1,7	L	892	778	27,57	285	0,115	0,542
		D	885	778	21,64		0,095	0,922
		T	905	762	23,99		0,101	0,990
2B		L	906	777	26,03	297	0,112	0,820

1.4301 (v1)									
ID	Espesor (mm)	Orientación	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	n	r	
	2	D	906	781	17,42		0,084	-	
		T	914	775	20,67		0,093	-	
		2C	L	891	797	26,51	296	0,106	0,724
			D	895	806	14,66		0,049	-
			T	907	772	19,27		0,089	-
2D		L	924	821	25,33	299	0,118	0,797	
		D	908	804	19,59		0,093	-	
		T	925	775	22,23		0,100	1,245	
2E		L	900	749	28,00	298	0,145	0,710	
		D	888	757	26,04		0,115	0,784	
		T	911	747	25,61		0,118	1,154	
2F		L	931	817	24,93	309	0,115	0,663	
		D	913	801	18,35		0,088	-	
		T	933	798	20,30		0,096	0,902	
2G		L	911	765	25,97	295	0,126	0,585	
		D	888	766	23,97		0,103	0,463	
		T	919	768	24,84		0,106	1,342	
2H		L	924	811	25,62	315	0,115	0,583	
		D	903	798	19,75		0,094	-	
		T	927	798	21,99		0,097	0,635	
2I		L	930	784	26,12	302	0,153	0,621	
		D	920	782	22,95		0,113	0,661	
		T	941	752	22,89		0,121	0,869	
3A		L	916	821	26,42	303	0,118	0,743	
		D	910	792	21,14		0,097	0,913	
		T	937	769	22,88		0,107	1,186	
3B		L	930	830	24,55	313	0,102	0,827	
		D	953	825	13,61		-	-	
		T	966	800	15,70		0,077	-	
3C		L	952	837	22,56	310	0,102	1,312	
		D	959	859	11,92		-	-	
		T	980	818	18,10		0,083	-	
3D		L	961	856	20,97	314	0,096	-	
		D	983	848	11,82		-	-	
		T	997	849	13,32		-	-	

1.4301 (v1)								
ID	Espesor (mm)	Orientación	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	n	r
3E		L	933	834	22,97	310	0,100	1,080
		D	935	817	16,60		0,068	-
		T	956	814	17,02		0,083	-
3F		L	931	827	24,02	308	0,109	0,413
		D	930	797	14,96		0,048	-
		T	950	787	18,81		0,093	0,738
3G		L	904	833	24,50	304	0,103	0,359
		D	917	809	13,78		-	-
		T	936	802	15,67		0,074	-
3H		L	928	852	22,25	308	0,095	-
		D	943	839	12,17		-	-
		T	966	820	18,59		0,079	-
3I		L	920	824	24,36	298	0,114	0,549
		D	913	791	18,72		0,088	-
		T	940	781	20,55		0,097	1,106
4A	2,3	L	951	832	23,25	337	0,115	0,749
		D	959	834	14,76		0,056	-
		T	978	822	20,63		0,101	1,150
4B		L	1004	857	22,82	346	0,147	0,655
		D	1019	849	19,93		0,109	0,661
		T	1030	803	20,06		0,124	0,891
4C		L	917	804	26,35	318	0,120	0,602
		D	941	818	16,19		0,074	-
		T	970	822	18,57		0,090	-

Tabla AIII.1.- Propiedades mecánicas del tipo EN 1.4301 (v1) ¼ duro

1.4301 (v2)								
ID	Espesor (mm)	Orientación	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	n	r
5	1,5	L	914	818	24,42	295	0,120	0,389
		D	899	782	19,23		0,095	-
		T	928	753	22,09		0,106	0,716
6	2,0	L	911	845	26,20	306	0,099	-
		D	926	827	11,41		-	-
		T	939	813	13,24		-	-
7	2,3	L	896	821	26,37	318	0,096	-
		D	904	797	13,02		-	-
		T	923	780	15,75		0,071	-
8	2,7	L	914	786	24,69	337	0,099	0,686
		D	931	828	15,41		-	-
		T	941	826	19,05		0,080	-

Tabla AIII.2.- Propiedades mecánicas del EN 1.4301 (v2) ¼ duro

1.4310								
ID	Espesor (mm)	Orientación	Rm (MPa)	Rp <sub>0.2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	n	r
9A	2,6	L	891	715	30,90	295	0,148	0,936
		D	886	733	29,93		0,130	1,111
		T	908	734	28,07		0,131	1,911
9B		L	881	722	34,13	310	0,129	0,599
		D	875	731	32,94		0,114	0,454
		T	884	732	31,89		0,129	0,712
9C		L	923	653	30,75	303	0,596	0,306
		D	921	663	29,72		0,601	0,258
		T	927	690	30,96		0,797	0,241

Tabla AIII.3.- Propiedades mecánicas del EN 1.4310 ¼ duro

**b) Grado de endurecimiento ½ duro**

1.4301 (v1)								
ID	Espesor (mm)	Orientación	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	n	r
10A	0,6	L	1160	1065	6,08	381	-	-
		D	1171	974	7,46		-	-
		T	1188	957	7,84		-	-
10B		L	1114	993	5,54	357	-	-
		D	1117	933	5,97		-	-
		T	1136	941	7,57		-	-
11A	0,7	L	1031	938	20,08	344	0,106	0,702
		D	1034	893	10,01		-	-
		T	1042	848	14,60		-	-
11B		L	992	884	21,95	325	0,117	0,493
		D	970	847	11,48		-	-
		T	984	825	16,34		0,087	-
12A	2,4	L	972	873	21,61	328	0,098	0,737
		D	979	861	12,53		-	-
		T	992	860	13,20		0,082	-
12B		L	920	815	23,01	346	0,098	0,769
		D	944	845	14,12		-	-
		T	944	826	16,88		-	-

Tabla AIII.4- Propiedades mecánicas del EN 1.4301 (v1) ½ duro

**c) Grado de endurecimiento ¾ duro**

1.4301 (v1)								
ID	Espesor (mm)	Orientación	Rm (MPa)	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)	A (%)	Dureza (HV)	n	r
13A	0,75	L	1151	1014	5,64	355	-	-
		D	1166	970	6,02		-	-
		T	1169	962	6,87		-	-
13B		L	1201	1055	4,60	365	-	-
		D	1212	1010	4,65		-	-
		T	1239	1022	6,17		-	-

Tabla AIII.5- Propiedades mecánicas del EN 1.4301 (v1) ¾ duro

## **ANEXO IV**

---

### **RESULTADOS DEL ENSAYO SPRINGBACK**

## **ANEXO IV.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE SPRINGBACK**

### **a) Muestras tras el ensayo de Springback**



*Figura AIV.1.- Muestras tras el ensayo de springback*

- Grado de endurecimiento  $\frac{1}{4}$  duro

1.4301 (v1)						
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Módulo Elástico (MPa)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	SPB (%)
1A	1,5	70,0	191.058	105,87	25,74	20,24
1B			230.231	109,54	27,07	20,24
1C			202.410	108,80	26,80	20,24
1D			184.727	108,83	26,82	20,24
1E			202.335	107,20	26,22	19,76
2A	1,7	66,0	217.808	132,95	31,39	19,28
2B			201.993	131,24	30,84	21,64
2C			185.045	125,93	29,14	19,28
2D			191.510	132,64	31,29	19,28
2E			185.441	131,11	30,80	19,28
2F			210.273	132,80	31,34	19,28
2G			195.547	131,82	31,03	19,28
2H			188.295	137,32	32,79	18,29
2I			177.987	131,52	30,93	18,79
3A	2,0	60,0	197.201	174,62	38,03	18,29
3B			196.188	177,81	38,90	18,29
3C			187.828	169,75	36,71	18,29
3D			197.243	177,22	38,74	18,79
3E			217.184	178,00	38,95	18,29
3F			233.532	183,78	40,53	17,79
3G			199.575	169,67	36,69	17,79
3H			179.848	177,58	38,84	17,28
3I			197.201	174,62	38,03	18,29
4A	2,3	61,67	181.354	233,67	47,06	17,79
4B			188.314	231,87	46,63	15,72
4C			217.749	227,30	45,55	15,19

Tabla AIV.1.- Resultados de la recuperación elástica del EN 1.4301 (v1) con grado de endurecimiento  $\frac{1}{4}$  duro



1.4301 (v2)						
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Módulo Elástico (MPa)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	SPGB (%)
5	1,5	70,00	205.331	99,84	23,55	18,79
6	2,0	60,00	197.974	177,09	38,71	18,29
7	2,3	61,67	175.754	207,32	40,82	15,72
8	2,7	55,00	189.927	292,92	52,04	14,10

Tabla AIV.2.- Resultados de la recuperación elástica del EN 1.4301 (v2) con grado de endurecimiento  $\frac{1}{4}$  duro

1.4310						
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Módulo Elástico (MPa)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	SPGB (%)
9A	2,6	48,00	168.820	229,54	40,76	13,55
9B			194.121	243,78	43,75	13,55
9C			202.335	242,06	43,39	14,76

Tabla AIV.3.- Resultados de la recuperación elástica del EN 1.4310 con grado de endurecimiento  $\frac{1}{4}$  duro

- Grado de endurecimiento  $\frac{1}{2}$  duro

1.4301 (v1)						
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Módulo Elástico (MPa)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	SPGB (%)
10A	0,6	85,00	224.065	45,38	9,43	32,66
10B			197.802	45,03	9,10	31,28
11A	0,7	82,50	197.839	44,059	7,05	30,21
11B			207.089	45,845	8,44	27,96
12A	2,4	60,00	193.508	249,18	48,62	16,25
12B			203.659	241,41	46,86	15,19

Tabla AIV.4.- Resultados de la recuperación elástica EN 1.4301 (v1) con grado de endurecimiento  $\frac{1}{2}$  duro

- Grado de endurecimiento  $\frac{3}{4}$  duro

1.4301 (v1)						
ID	Espesor (mm)	Reducción (%)	Módulo Elástico (MPa)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	SPGB (%)
13A	0,75	83,33	206.902	54,65	14,27	30,21
13B			216.732	56,14	15,36	29,47

*Tabla AIV.5.- Resultados de la recuperación elástica EN 1.4301 (v1) con grado de endurecimiento  $\frac{3}{4}$  duro*

## **ANEXO V**

---

### **ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL TRAS EL ENSAYO DE SIMULACIÓN HAZ**

**ANEXO V.- RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL  
TRAS EL ENSAYO DE SIMULACIÓN HAZ**

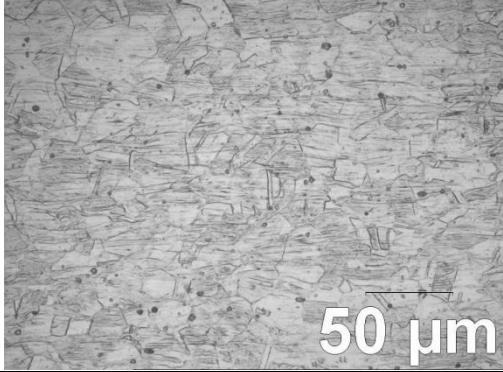
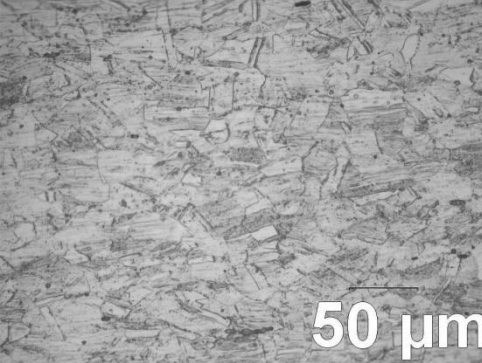
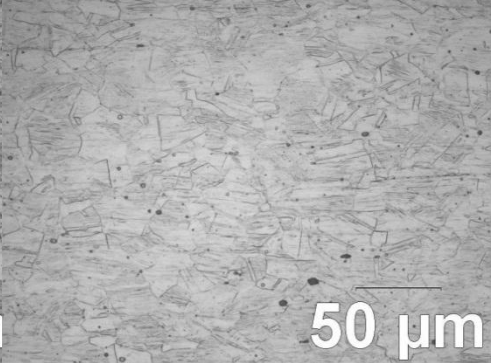


A1	
	
50 $\mu\text{m}$	
T <sup>a</sup> Ambiente (sin T <sup>i</sup> )	
INPUT 1	
7mm	12mm
	
50 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
	
50 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.1.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) 1/2 duro y espesor 0,7mm

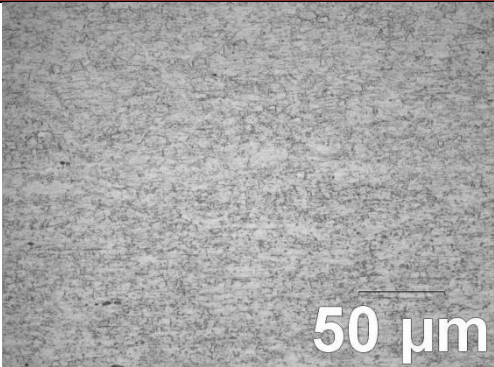

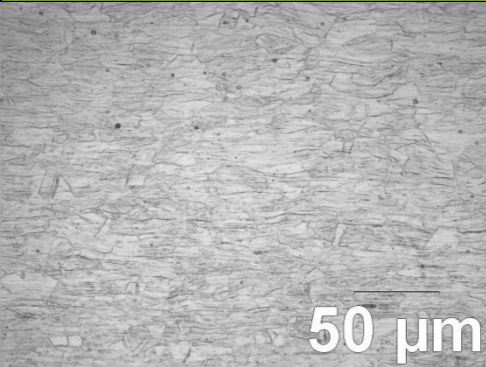
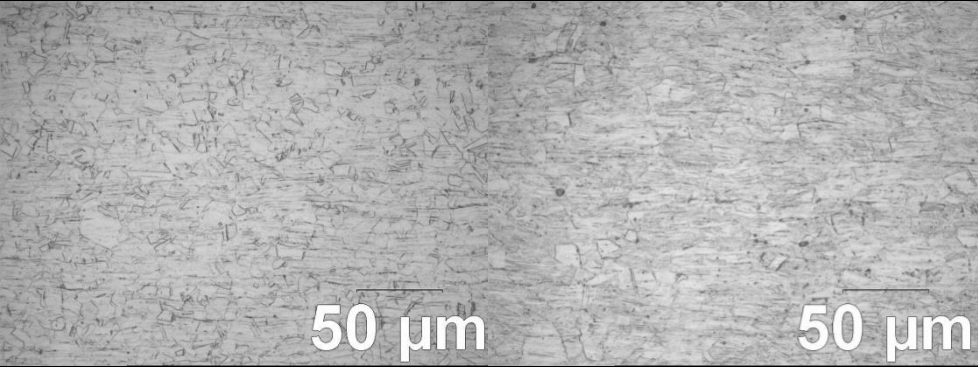
A2	
	
Tª Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.2.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) ¼ duro y espesor 0,75mm

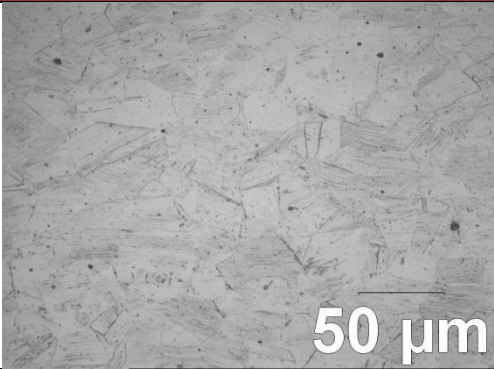
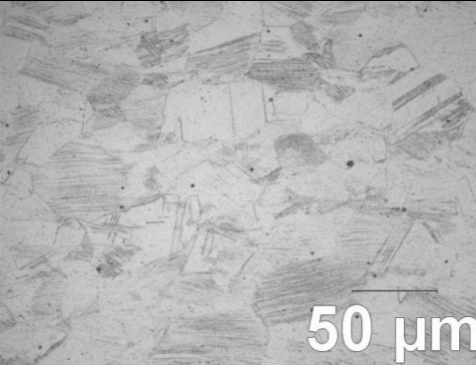
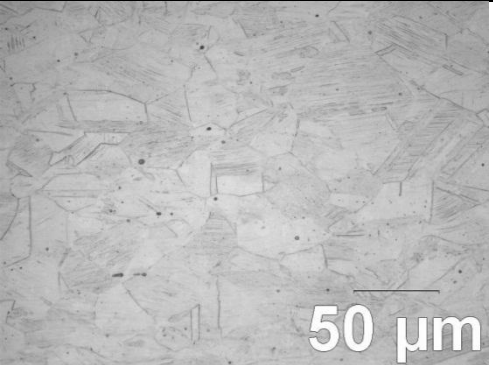

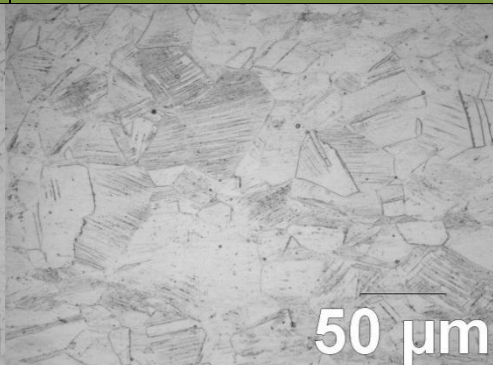
B1	
	
T <sup>a</sup> Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.3.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) ¼ duro y espesor 2,3mm



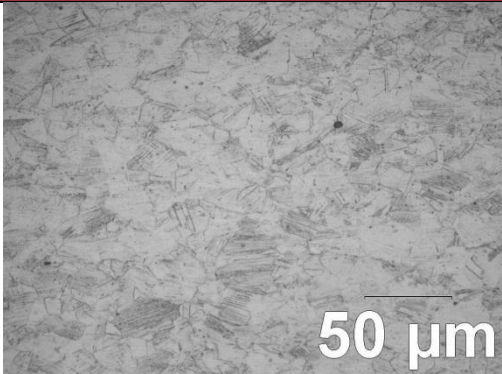

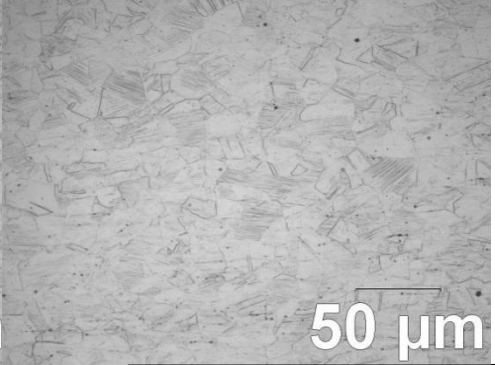


B2	
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	
T <sup>a</sup> Ambiente (sin T <sup>t</sup> I)	
INPUT 1	
7mm	12mm
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.4.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) ½ duro y espesor 2,4mm

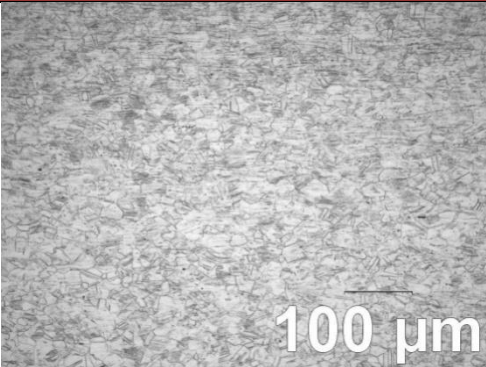
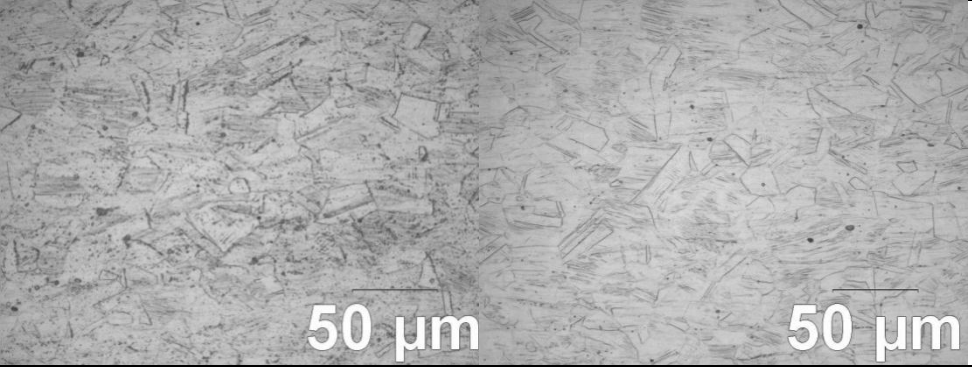
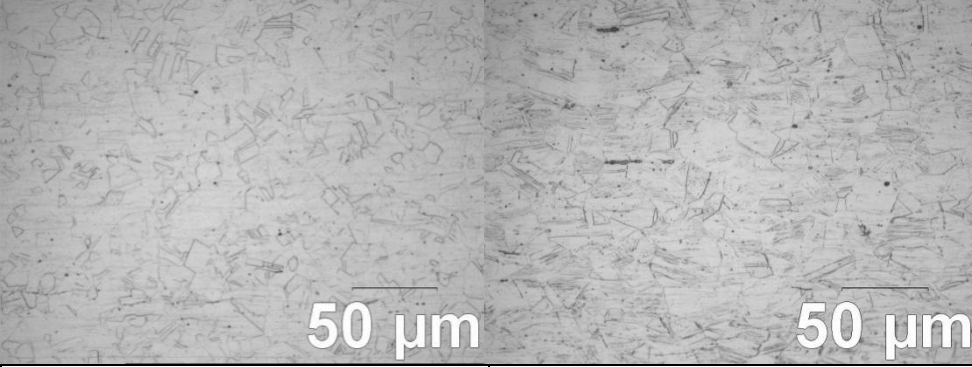
C1	
	
Tª Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.5.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) ¼ duro y espesor 1,5mm



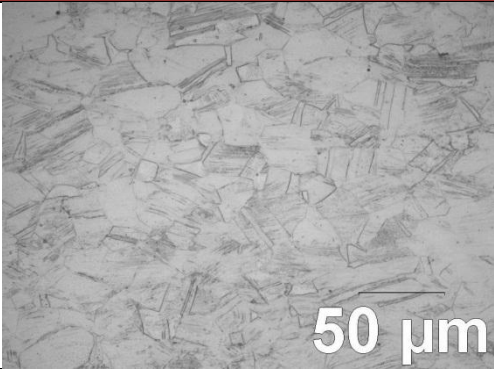




C2	
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	
Tª Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.6.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v2) ¼ duro y espesor 1,5mm

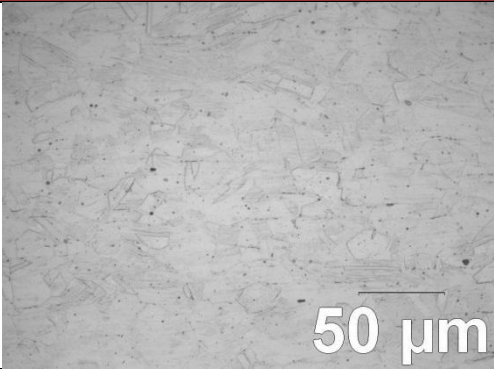
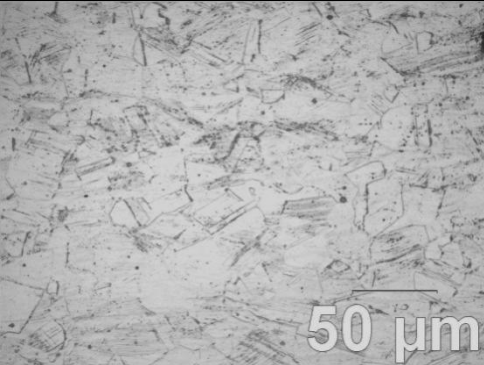
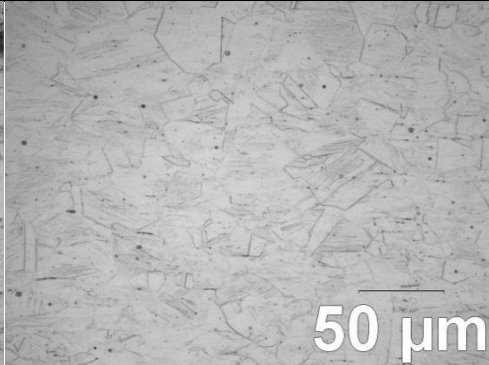


D1	
	
T <sup>a</sup> Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.7.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v1) ¼ duro y espesor 2,3mm

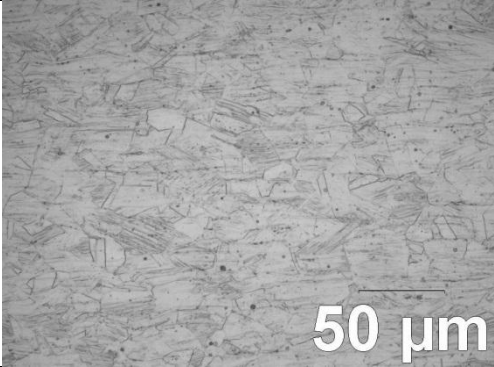

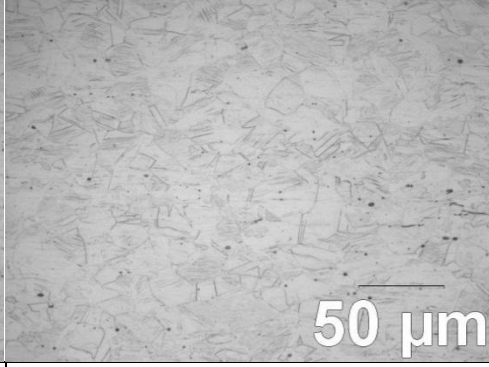

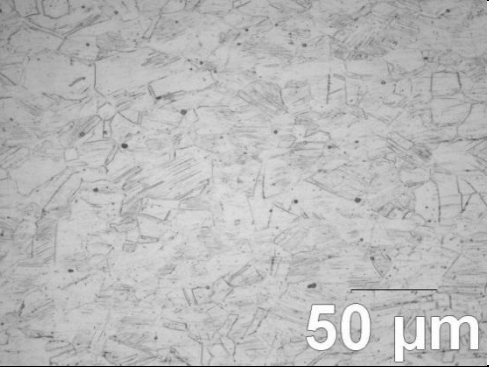
D2	
	
T <sup>a</sup> Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.8.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v2) ¼ duro y espesor 2,3mm

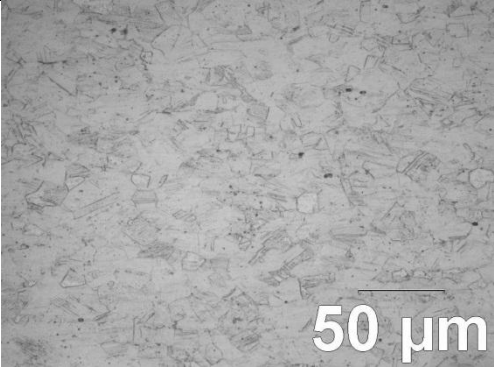
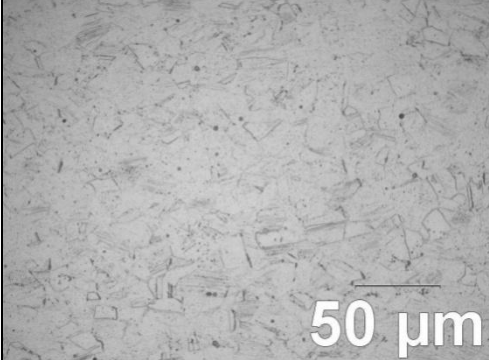
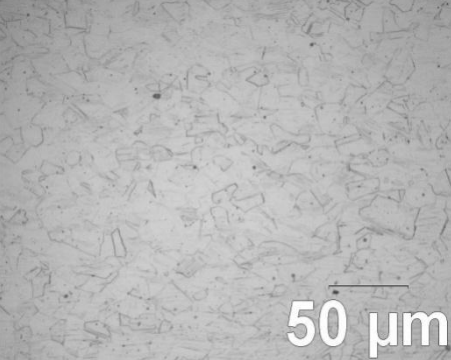

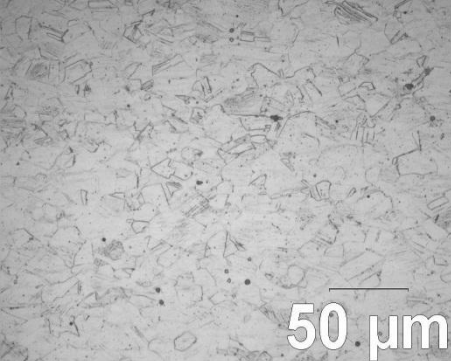
E1	
	
T <sup>a</sup> Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
	
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.9.- Resultados de la microestructura del EN 1.4301 (v2) ¼ duro y espesor 2,7mm



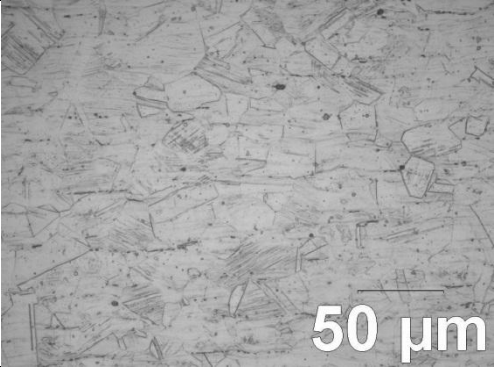
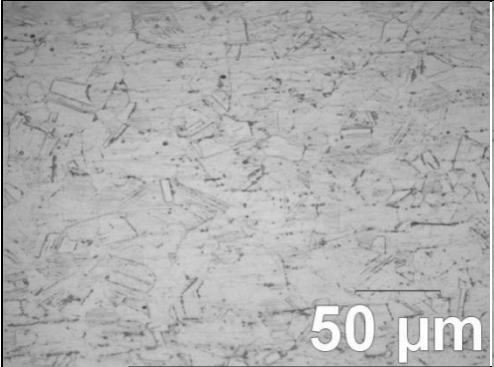
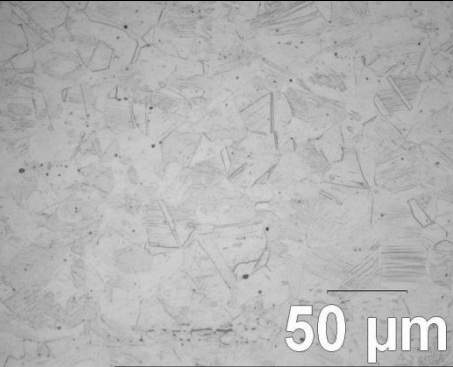
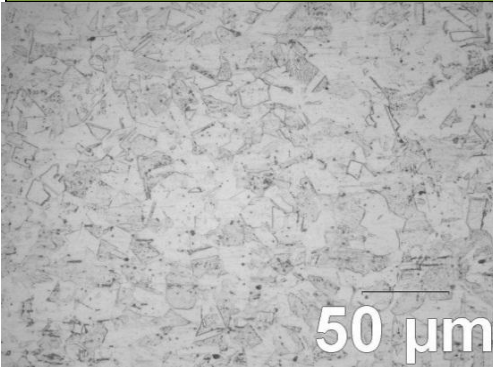
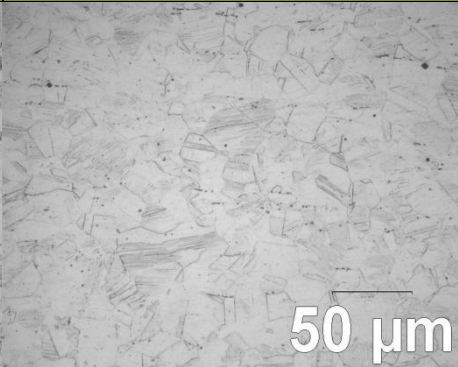
E2	
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	
Tª Ambiente (sin TT)	
INPUT 1	
7mm	12mm
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>
T <sub>p</sub> : 623 °C	T <sub>p</sub> : 236 °C
INPUT 2	
7mm	12mm
 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>	 <p>50 <math>\mu\text{m}</math></p>
T <sub>p</sub> : 1030 °C	T <sub>p</sub> : 389 °C

Tabla AV.10.- Resultados de la microestructura del EN 1.4310 ¼ duro y espesor 2,6mm

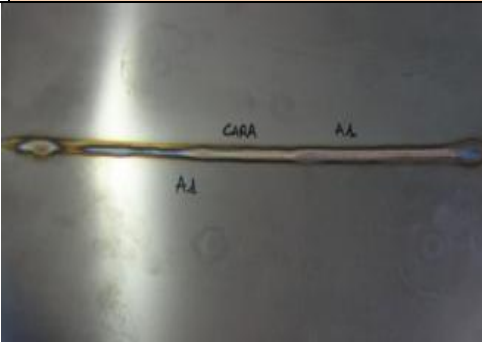
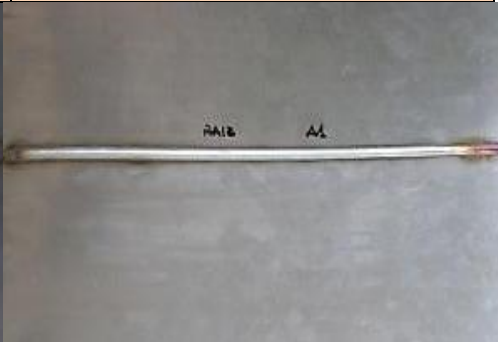

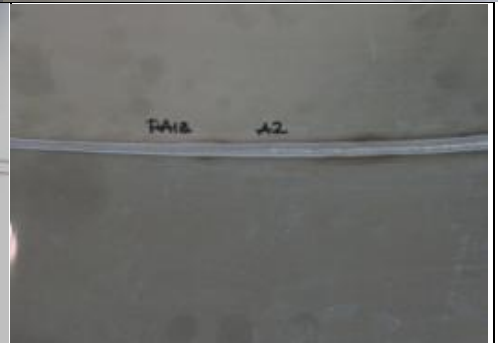



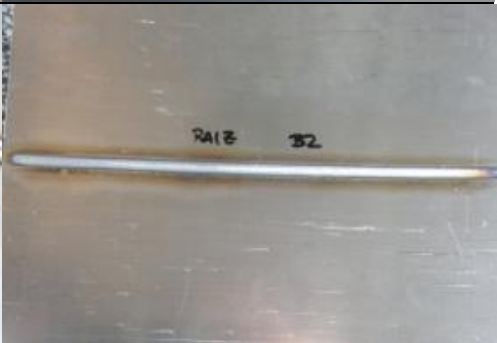
## **ANEXO VI**

---

### **RESULTADOS DE LAS MUESTRAS SOLDADAS CON TIG SIN APORTE**

**ANEXO VI.- RESULTADOS DE LAS MUESTRAS SOLDADAS CON TIG  
SIN APORTE**

**a) Inspección visual de las muestras soldadas**

	CARA	RAÍZ
A1		
A2		
B1		
B2		

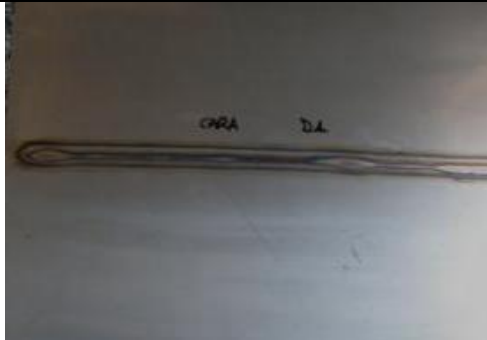
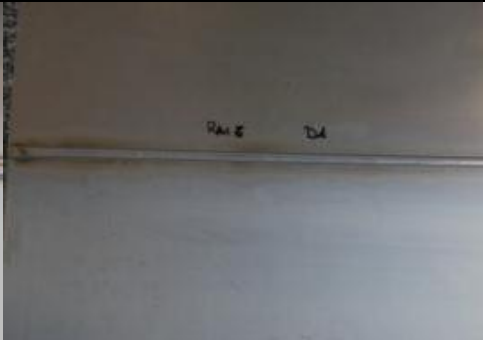


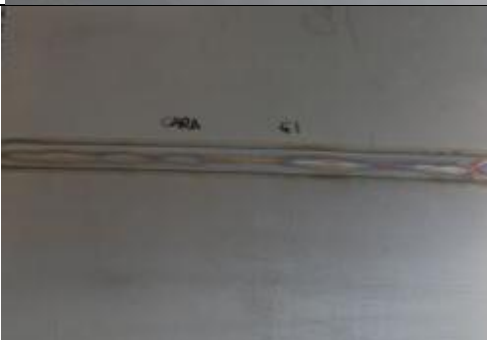

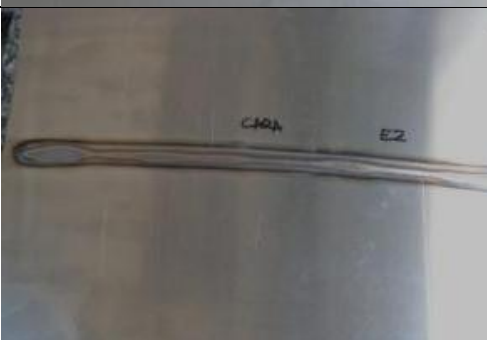

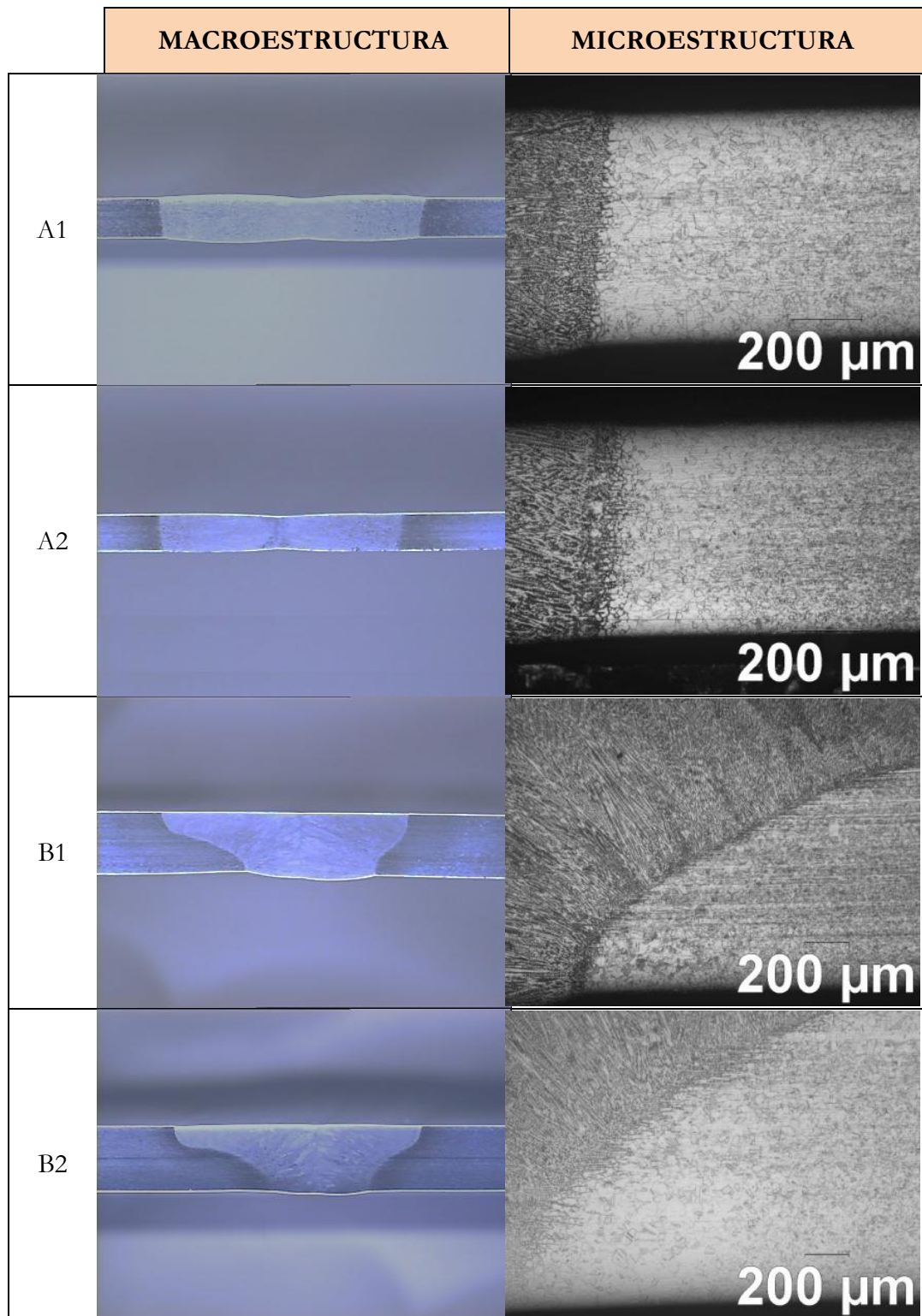
	CARA	RAÍZ
D1		
D2		
E1		
E2		

Tabla AVI.1.- Inspección visual de las muestras soldadas con TIG



b) Análisis estructural de las muestras soldadas



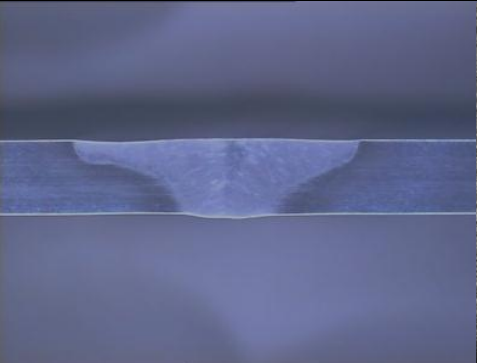
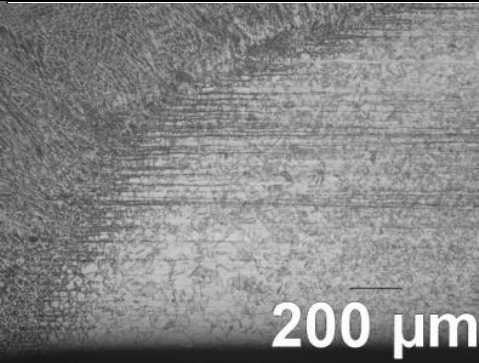
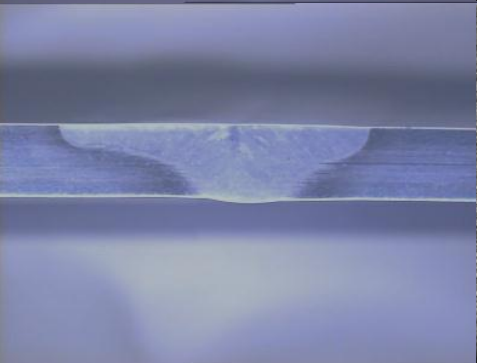
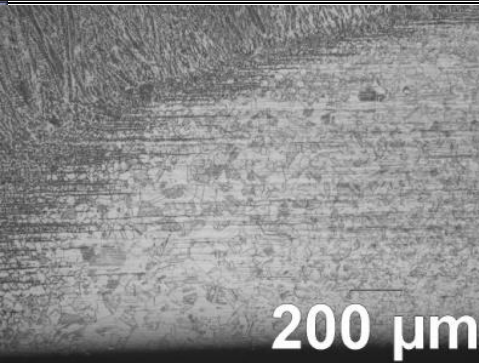

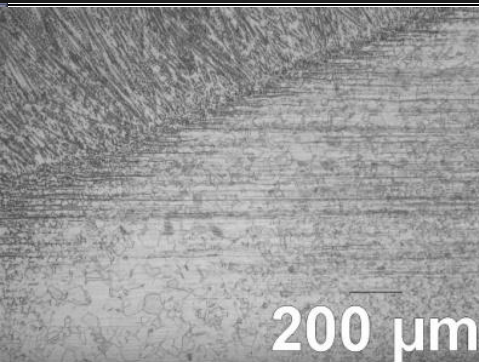
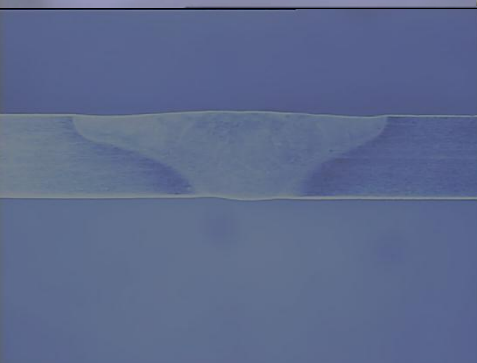
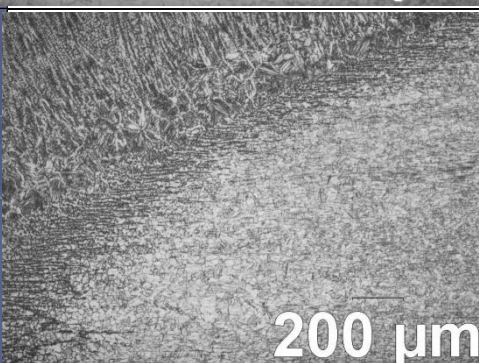
	MACROESTRUCTURA	MICROESTRUCTURA
D1		
D2		
E1		
E2		

Tabla AVI.2.- Análisis macroestructural y microestructural de las muestras soldadas con TIG

# BIBLIOGRAFÍA

---

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Adams C. M., Arthur L Philips (1968) “Welding Handbook: Fundamentals of welding”. American Welding Society, 7<sup>ed</sup>, EEUU, vol. 1, 80-89.
- [2] Angel T. (1954). "Formation of martensite in austenitic stainless steels"
- [3] Allain S., Chateau J.P., O. Bouaziz, S. Migot, N. Guelton. (2004). “Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys”. Materials Science and Engineering: A, vol. 387-389, 158-162.
- [4] ASTM 666:2010 “Standard Specification for Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar”
- [5] ASTM E3:2011. "Standard practice for preparation of metallographic specimens"
- [6] ASTM E112:2010. "Standard test method for determining average grain size".
- [7] ASTM E517:2010 "Standard test method for plastic strain ratio  $r$  for sheet metal”
- [8] ASTM E646:2007. "Standard test method for tensile strain-hardening exponents ( $n$ -values) of metallic sheet materials.
- [9] Badoo N. (2009) “Designing structural stainless steel members to eurocode 3” NSC. EuroInox, Inglaterra, 30-32.
- [10] Banabic, D., Bunge, H.J., Pöhlandt, K. and Tekkaya, A.E. (2000) “Formability of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits”. Engineering Materials, Springer, 1<sup>ed</sup>, Alemania.
- [11] Carstein Greisert (2004) “Strain-induced formation of martensite during forming and springback behaviour of annealed and hard cold-rolled stainless steel grades EN 1.4301 and 1.4318” Shaker Verlag GmbH, Aachen, vol. 2004-2005 de Berichte Aus Dem Institut Fur Eisenhutenkunde Series.

- [12] Colombier L., Colombier R. and Hochmann J. (1968) “Aceros inoxidables, aceros refractarios” Ediciones Urmo, 1º ed, Pensilvania, 108-112.
- [13] Colombier L., Colombier R. and Hochmann J. (1968) “Aceros inoxidables, aceros refractarios” Ediciones Urmo, 1º ed, Pensilvania, 50-51.
- [14] Cunat P.J. (2002). "Manual de aceros inoxidables de Euro-Inox". Asociación para el Desarrollo del Acero Inoxidable, 1ºed.
- [15] D. Pecker, Berstein I. M. (1977) “Handbook of stainless steel. Metallurgy of stainless steels” Mc Graw Hill, Nueva York, 4.23-4.35.
- [16] Davis J.R (1994) "ASM Specialty Handbook: Stainless steels". ASM International, 1ºed, EEUU.
- [17] Di Caprio G. (1999) “Los aceros inoxidables”. Grupinox, 3ºed, Francia, 25-93.
- [18] Di Caprio G. (1999) “Los aceros inoxidables”. Grupinox, 3ºed, Francia, 349-382.
- [19] Documento interno de características de los equipos de ensayos del Laboratorio de acería de Acerinox Europa S.A.U.
- [20] Documento interno de fabricación de los acabados endurecidos en Acerinox Europa S.A.U.
- [21] Donald R. Askeland. (2004) “Ciencia e Ingeniería de los Materiales”. Cengage Learning Latin America, 4º ed.
- [22] E. Mirambel, E. Real, N. Badoo (2006). “Manual de diseño para el acero inoxidable estructural” Euro-Inox and Steel Construction Institute, 3º ed, Inglaterra.
- [23] Easterrling K.E, Porter D.A (1992) “Phase transformation in Metals and Alloys” Chapman and Hall, 2º ed, Londres.
- [24] Ficha técnica del tipo de acero ACX 120 (EN 1.4301). Acerinox Europa S.A.U.
- [25] G. Sergio, Laufgang. Curso de inspectores de soldadura IAS “Tratamiento térmico de soldadura” Termo Soldex S.A., Facultad de Ingeniería UBA. Argentina.

- [26] George E. Dieter. (1986). "Mechanical Metallurgy" Materials Science and Engineering, Mc. Graw Hill, Nueva York, 3ª ed.
- [27] González J.L (1999). "Metalurgia mecánica". Limusa, 1ª ed, Mexico.
- [28] Goodwin, G.M. (1968) "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop" *La metallurgia italiana*, Italia, vol. 60, 764-774.
- [29] Ghosh S.K, Mallick P., Chattopadhyay P.P (2012) "Effect of cold deformation on phase evolution and mechanical properties in an austenitic stainless steel for structural and safety applications" *Journal of iron and steel research, International*, India, vol. 19, 63-68.
- [30] Gutierrez D. (2009) "Estudio de la conformabilidad en aceros AHSS y aceros de embutición", *Ingeniería de materiales*, Universidad de Cataluña.
- [31] Hosford, W.F., Caddell, R. (2011) "Metal forming: mechanics and metallurgy". Cambridge University Press, 4ª ed, Inglaterra
- [32] [http://www.fomento.gob.es/mfom/lang\\_castellano/direcciones\\_generales/marcadoce\\_eurocodigos/eurocodigos.htm](http://www.fomento.gob.es/mfom/lang_castellano/direcciones_generales/marcadoce_eurocodigos/eurocodigos.htm)
- [33] Kara F., Kacar R., Gündüz S. (2009) "The effect of process parameter on the properties of spot welded cold deformed AISI304 grade austenitic stainless steel" *Journal of materials processing technology*, vol. 209, 4011-4019.
- [34] Keeler, S.P (1965) "Determination of forming limits in automotive stampings". *Sheet Met. Ind.*, vol. 42, 683-691.
- [35] Laufgang S. (2003). "Aceros inoxidables". Tratamiento térmico de soldadura, Termo soldex S.A.
- [36] Manual interno del equipo Gleeble 1500D "Heat affected zone software" Acerinox Europa S.A.U.

- [37] Nohara K., Ono Y. y Ohashi N. (1977). "Compositional and grain-size dependencies of strain-induced martensitic transformation in metastable austenitic stainless steel". Journal of iron and steel Institute of Japan, vol. 63, 212-222.
- [38] Padilla E (1999), "Aplicaciones de los Aceros Inoxidables" Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Perú.
- [39] Poorhaydari K., Patchett B. M., and Ivey D.G. (2005) "Estimation on cooling rate in the welding of plates with intermediate thickness" Welding Journal, Universidad de Alberta, vol. 84, 149-155.
- [40] Reina M. (1988). "Soldadura de los aceros. Aplicaciones", 2º ed, Madrid, 235-243, 347-359.
- [41] Sánchez Rodríguez R. (2008) "Curso de soldadura" Acerinox Europa S.A.U
- [42] Shouler DR, Allwood JM (2009) "Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states" International Journal of plasticity, vol. 25, 1207-1230
- [43] Sydney H. Avner (1990). "Introducción a la Metalurgia Física". Mc. Graw Hill. 2ºed Mexico D.F
- [44] Talja A., Vilpas M., Huhtala L., Yrjölä P. (2003) "Design of welded connections of cold-worked stainless steel RHS members" The Steel Construction Institute, Finlandia, 35-48.
- [45] Tayler B.V. "Sheet Formability Testing" Metals Handbook Volume 8: Mechanical Testing. American Society for Metals, EEUU, 550-551.
- [46] UNE EN 7-472:1989 "Materiales metálicos. Ensayo de doblado simple"
- [47] UNE-EN 1321:1997 "Ensayos destructivos de soldadura de materiales metálicos. Examen macroscópico y microscópico de soldadura".

- [48] UNE-EN 1993-1-1:2013 “Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios”
- [49] UNE EN 1993-1-4:2012.“Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-4: Reglas generales. Reglas adicionales para los aceros inoxidables”
- [50] UNE-EN 4136:2013 “Ensayos destructivos de soldadura de materiales metálicos. Ensayo de tracción transversal”.
- [51] UNE-EN-ISO 4287:1999 “Especificación geométrica de productos. Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial.”
- [52] UNE-EN 5173:2011 “Ensayos destructivos de soldadura de materiales metálicos. Ensayo de doblado”.
- [53] UNE-EN ISO 6507-1: 2006. “Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo”.
- [54] UNE-EN ISO 6508-1:2007 “Materiales metálicos. Ensayo de dureza Rockwell. Parte 1: Método de ensayo (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)
- [55] UNE EN ISO 6892-1:2010. “Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente”
- [56] UNE-EN 9015-2:2011 “Ensayos destructivos de soldadura de materiales metálicos. Parte 2: Ensayo microdureza de uniones soldadas”
- [57] UNE EN 10021:2008. “Condiciones técnicas de suministro generales para los productos de acero”
- [58] UNE-EN 10088-1: 2006." Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables".
- [59] UNE-EN 10088-2: 2008." Condiciones técnicas de suministro para chapas y bandas de acero resistentes a la corrosión para usos generales".



- [60] UNE EN 15614-1 “Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Ensayo del procedimiento de soldeo. Parte 1: soldeo por arco y con gas de aceros y soldeo por arco de níquel y sus aleaciones”
- [61] UNE-EN ISO 20482. “Materiales metálicos. Chapas y flejes. Ensayo de embutición Erichsen”
- [62] Welding Metallurgy “Heat Flow in Welding”
- [63] William D. Callister. Jr “Introducción a la Ciencia e ingeniería de los materiales”, Reverte. 3º ed, Universidad de Utah, EEUU.

